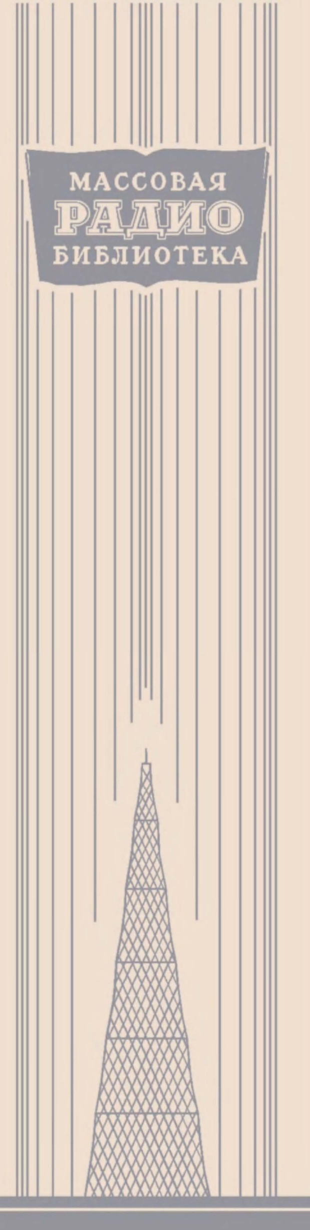
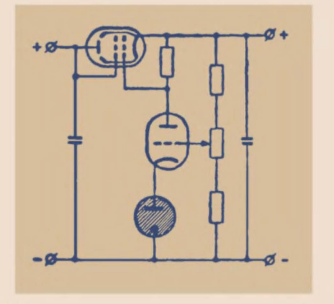


К. Б. МАЗЕЛЬ

СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ
1955

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 218

К. Б. МАЗЕЛЬ

СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1955 ЛЕНИНГРАД

Scan AAW

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
А. И. Берг, И. С. Джигит, О. Г. Елин, А. А. Куликовский, Б. Н. Можжевелов, А. Д. Смирнов, Ф. И. Тарасов, Б. Ф. Трамм, П. О. Чечик, В. И. Шамшур

В брошюре описываются основные схемы стабилизаторов напряжения и тока. Приводятся формулы и примеры расчета электромагнитных стабилизаторов, стабилизаторов с бареттерами и лампами тлеющего разряда и электронных стабилизаторов напряжения и тока. Приводятся также формулы и примеры расчета выпрямителей.

Брошюра рассчитана на подготовленного радиолюбителя.

Автор *Климентий Борисович Мазель* — „Стабилизаторы напряжения и тока"

* * *

Редактор *А. М. Бройде* Технич. редактор *И. М. Скворцов*

* * *

Сдано в набор 8/II 1955 г. Подписано к печати 19/III 1955 г.
Бумага 84/108/32. Объем 6,97 п. л. Уч.-изд. л. 7,5
Т-01773 Тираж 25 000 экз. Цена 3 руб. Заказ 49

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТАБИЛИЗАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

Автоматическое регулирование. Современная техника радиоприема, обеспечивая высокое качество воспроизведения радиовещательных и телевизионных передач, связана с почти неизбежным усложнением схемы, а следовательно, с увеличением числа ламп и введением в схему ряда дополнительных устройств.

К числу вспомогательных схем, улучшающих качество работы приемного устройства и главным образом упрощающих управление им, относятся, в первую очередь, схемы автоматического регулирования.

Наиболее распространенными видами автоматического регулирования являются:

1) автоматическое регулирование усиления — АРУ (известное также под названием регулирования чувствительности — АРЧ), обеспечивающее малое изменение мощности на выходе приемника при значительных изменениях напряжения сигнала на входе и применяющееся как один из основных способов борьбы с явлением «замирания»;

2) автоматическое регулирование тона—АРТ, расширяющее полосу частот, пропускаемых усилителем низкой частоты при сильных сигналах и сужающее эту полосу при слабых сигналах, что ослабляет влияние помех при приеме слабых сигналов;

3) автоматическое регулирование избирательности — АРИ, аналогичное АРТ, но отличающееся тем, что сужение полосы при слабых сигналах происходит не в низкочастотной части приемника, а в каскадах усиления высокой или промежуточной частоты;

4) автоматическая «тихая» (или «бесшумная») настройка — АТН, устраняющая шумы и трески при перестройке

с одной станции на другую, когда приемник при наличии АРУ обладает полной чувствительностью;

5) автоматическая подстройка частоты — АПЧ, поддерживающая точную настройку приемника на принимаемую станцию;

6) автоматическое регулирование диапазона громкости сигнала — экспандирование, создающее требуемую контрастность между наиболее тихими и громкими звучаниями передачи;

7) стабилизация напряжения и тока — автоматическое регулирование питающих напряжений и токов, обеспечивающее сравнительное постоянство питающих напряжений или токов при изменениях напряжения сети и сопротивления нагрузки.

Применение ряда автоматических регулирований позволило значительно упростить управление радиоприемными устройствами и обеспечить автоматическое поддержание оптимальных условий приема при непрерывных изменениях величины сигнала и напряжения питания. Кроме того, авторегулирование в ряде случаев компенсирует изменения, происходящие в приемнике из-за нарушений режимов работы его элементов.

В данной брошюре рассматриваются схемы автоматического регулирования последнего вида, т. е. схемы стабилизаторов напряжения и тока.

Создателями науки об автоматическом регулировании являются русские ученые П. Л. Чебышев, И. А. Вышнеградский, Н. Е. Жуковский, А. М. Ляпунов и А. Н. Крылов. Первый в мире регулятор напряжения был разработан Э. М. Ленцем и Б. С. Якоби. Еще в 1914 г. Н. Д. Папалекси использовал для регулирования напряжения дроссель, управляемый постоянным током (дроссель насыщения). Крупными работами в области автоматического регулирования являются труды советских ученых А. А. Андронова, В. С. Кулебакина и С. А. Лебедева. Большое число оригинальных схем стабилизаторов напряжения предложено советскими инженерами.

Значение стабилизации напряжения и тока. Автоматическое поддержание постоянства питающего напряжения или тока применяется в радиоприемных, радиопередающих, телевизионных, радиоизмерительных и других устройствах. Наличие стабильного (устойчивого по величине) напряже-

ния или тока не только желательно, но во многих случаях необходимо. При отсутствии стабильного источника питания могут понизиться экономичность и срок службы устройства, а в некоторых случаях нарушится его нормальная работа.

Известно, например, что при повышении напряжения сети на 10% срок службы осветительных ламп сокращается примерно в 4 раза, а при понижении напряжения на 10% сила излучаемого ими света уменьшается почти на 40%. Срок службы мощных радиоламп сокращается почти на 15% при повышении напряжения накала на 1%.

В питающей сети наблюдаются изменения напряжения двух родов: медленные изменения напряжения, происходящие за период времени от нескольких минут до нескольких часов, и быстрые изменения напряжения, происходящие с частотой до нескольких раз в секунду. Первые вызываются постепенным увеличением или уменьшением общей нагрузки сети, а вторые — пуском и выключением различных электрических установок.

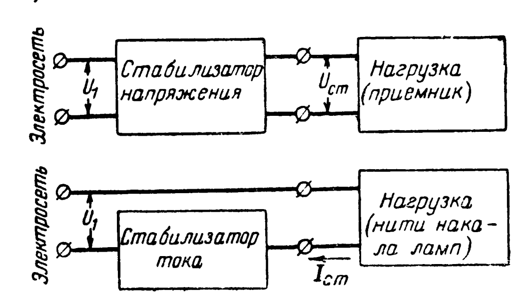
Эти изменения отрицательно влияют на качество радиоприема и, в особенности, на качество телевизионного изображения. Медленные колебания напряжения вызывают изменения размеров изображения, а также с течением времени его яркости и четкости (фокусировки). Изменение частоты гетеродина, влекущее за собой расстройку приемника и изменение усиления приемника, могущее вызвать появление искажений, также являются следствием медленных изменений напряжения питания. Быстрые изменения напряжения сети вызывают неприятное и утомляющее дрожание и мерцание телевизионного изображения.

Применение необходимого количества ручных регулировок позволяет на некоторый период времени (за счет усложнения управления приемником) компенсировать те изменения, которые вызываются медленными колебаниями напряжения. Однако нужно иметь в виду, что ручные регулировки не могут устранить последствий быстрых изменений напряжения.

Гальванические батареи и аккумуляторы можно на протяжении сравнительно небольшого периода времени (порядка нескольких часов) и при малых токах разряда рассматривать как источники стабильного напряжения. Однако использование батарей и аккумуляторов в подавляющем большинстве случаев нерационально из-за их большого

объема и веса, а также из-за присущих им эксплуатационных неудобств (смена, зарядка). Очевидно также, что батареи и аккумуляторы нельзя использовать в качестве источников стабильного тока при колебаниях сопротивления нагрузки.

Для получения стабилизованного напряжения или тока нужно включить между сетью и нагрузкой (например, радиоприемником) соответствующее стабилизирующее устройство (фиг. 1).



Фиг. 1. Блок-схема включения стабилизатора напряжения и стабилизатора тока.

Большинство стабилизаторов напряжения и тока практически безинерционно и одинаково хорошо работает как при медленных, так и при быстрых изменениях напряжения сети и сопротивления нагрузки. В первую очередь стабилизаторы должны быть использованы для питания тех цепей, изменение режима которых влияет на устойчивость и качество приема. К числу напряжений, требующих стабилизации, в частности, относятся: анодное напряжение генераторов разверток, влияющее на размеры изображения; напряжения, питающие цепи регулирования яркости и фокусировки; анодное напряжение гетеродинов, влияющее на генерируемую частоту; экранное напряжение усилителей высокой и низкой частоты, влияющее на усиление, и др.

Следует также отметить, что такие устройства, как клистронный сверхвысокочастотный генератор и электронный микроскоп, вообще не могут нормально работать без стабилизации питающих напряжений. Стабилизация напряжения питания в настоящее время обязательна также в ряде измерительных приборов (ламповых вольтметрах, осциллоскопах, измерительных генераторах и др.).

Большинство стабилизаторов напряжения обладает способностью поддерживать постоянство напряжения не только при изменениях напряжения сети, но и при изменениях тока или сопротивления нагрузки. Последнее свойство часто бывает весьма необходимым, например, при питании анодных цепей усилителя низкой частоты, работающего в классе В, когда потребляемый ток меняется в широких пределах. При питании такого усилителя от кенотронного выпрямителя, не снабженного стабилизатором, анодное напряжение будет заметно падать при увеличении тока потребления и увеличиваться при его уменьшении, что вызовет искажения усиливаемого сигнала. Свойство стабилизаторов напряжения поддерживать выходное напряжение при колебаниях нагрузки является особенно ценным при импульсном характере нагрузки. Большинство импульсных устройств, применяемых в различных областях радиотехники, питается от источников стабильного напряжения.

Кроме широко распространенных стабилизаторов напряжения, в практике встречаются стабилизаторы тока, которые обладают способностью поддерживать неизменным ток нагрузки при изменениях напряжения питающей сети и сопротивления нагрузки. Стабилизаторы тока применяются для питания фокусирующих катушек электронно-лучевых трубок с магнитным отклонением, нитей ламп, чувствительных к изменениям тока накала, обмоток специальных электромагнитов, обмоток возбуждения тахогенераторов, выходное напряжение которых должно быть строго пропорционально числу оборотов, и т. д. В некоторых типах магнитных усилителей одну из обмоток, ампервитки которой не должны изменяться, также целесообразно питать от стабилизатора тока.

Основные типы стабилизаторов напряжения и тока. Существующие стабилизаторы напряжения и тока можно разбить на пять групп:

1. Стабилизаторы с движущимися частями. Эти стабилизаторы правильнее называть электромеханическими авторегуляторами.

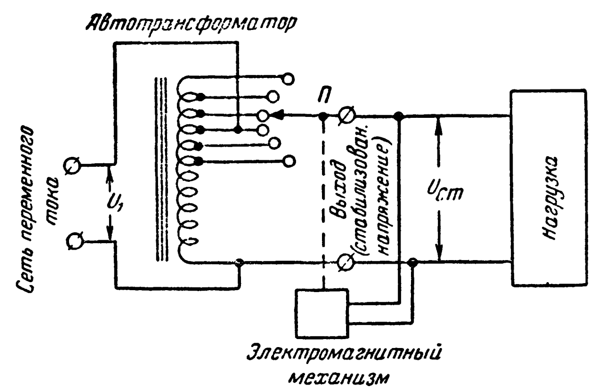
2. Электромагнитные стабилизаторы.

3. Стабилизаторы с магнитными усилителями.

4. Стабилизаторы, использующие нелинейную зависимость между током и напряжением (лампы накаливания, лампы с тлеющим разрядом, бареттеры, твердые выпрямители, специальные сопротивления и др.).

5. Стабилизаторы с электронными лампами (электронные стабилизаторы).

Простейшим примером *стабилизатора первой группы* может служить автотрансформатор, отводы которого автоматически переключаются в зависимости от величины выходного напряжения (фиг. 2). Выходное напряжение воздействует на электромагнитный механизм, жестко связанный с ползунком *П*. В случае понижения напряжения сети ползунок будет двигаться вверх, пока напряжение на выходе снова не достигнет нормального значения. Регулировка напряжения происходит не плавно, а небольшими скачками, величина которых зависит от напряжения между отводами автотрансформатора [1].



Фиг. 2. Электромеханический регулятор напряжения с автотрансформатором.

Угольные регуляторы, предназначенные, в основном, для автоматического регулирования напряжения генераторов постоянного и переменного тока, также относятся к группе электромеханических авторегуляторов.

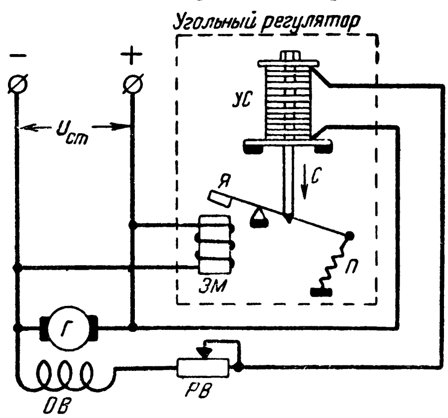
Схема включения угольного регулятора для стабилизации напряжения генератора постоянного тока представлена на фиг. 3. Регулятор состоит из угольного реостата (столбика) *УС*, включенного последовательно в цепь шунтовой обмотки *ОВ* генератора *Г* и электромагнита *ЭМ*, якорь которого *Я* оттягивается пружиной *П*. Реостат возбуждения *РВ*

[1] Подобная схема описана в брошюре: А. Г. Дольник и М. М. Эфрусси, Автоматический регулятор напряжения (Массовая радиобиблиотека), Госэнергоиздат, 1953.

служит для первоначальной установки выходного напряжения $U_{ст}$.

Включение угольного реостата *УС* в цепь шунтовой обмотки возбуждения (а не в цепь нагрузки) обеспечивает регулировку выходного напряжения с наименьшей затратой мощности и при минимальных размерах угольного реостата.

Угольный реостат образуется из одного или нескольких угольных столбиков, каждый из которых собирается из угольных шайб наложенных друг на друга. Сопротивление угольного столбика определяется, в основном, переходным сопротивлением контактов между шайбами, которое зависит от площади соприкосновения соседних шайб. Так как поверхность шайб шероховата, то площадь соприкосновения зависит от силы сжатия угольного столбика. Сильно сжатый столбик может обладать сопротивлением, равным долям ома, а сопротивление несжатого столбика может достигать тысячи ом и более.



Фиг. 3. Схема включения угольного регулятора для стабилизации напряжения генератора постоянного тока.

В угольных регуляторах типа РУН столбики состоят из 180—190 шайб толщиной около 0,5 *мм*; сопротивление столбиков меняется в зависимости от давления в пределах примерно от 5 до 80 *ом*.

Рассмотрим принцип действия угольного регулятора. При нормальном напряжении генератора *Г* сила, действующая на якорь электромагнита *ЭМ*, уравновешивается силой натяжения пружины *П*. При увеличении напряжения на зажимах генератора электромагнит сильнее притягивает якорь и тем самым уменьшает силу, стягивающую шайбы угольного реостата *УС*. Направление этой силы указано стрелкой *С*. Сопротивление угольного реостата возрастает и ток в цепи шунтовой обмотки возбуждения *ОВ* уменьшается до тех пор, пока напряжение генератора $U_{ст}$ не снизится поч-

ти до нормальной величины. Если напряжение генератора уменьшается, то начинает преобладать сила пружины *П*, давление на угольный столб увеличивается, его сопротивление уменьшается и ток возбуждения растет до тех пор, пока не восстановится нормальное напряжение генератора.

Угольные регуляторы описанного типа могут поддерживать выходное напряжение генератора с точностью порядка $\pm 2\%$.

Основными недостатками всех электромеханических авторегуляторов напряжения являются:

1) инерционность, определяемая конструкцией регуляторов, не позволяющая им реагировать на быстрые изменения напряжения сети;

2) наличие движущихся или трущихся частей, требующих ухода, регулировки и смены в процессе эксплуатации;

3) малая точность поддержания выходного напряжения;

4) сравнительная сложность и громоздкость конструкции.

Электромеханические авторегуляторы обычно применяются для регулирования переменного и постоянного напряжения в устройствах большой мощности.

Ко второй группе стабилизаторов (электромагнитных) относится большое количество устройств, в которых используется нелинейная зависимость между током и магнитным потоком в дросселе или трансформаторе с насыщенным стальным сердечником.

В электромагнитных стабилизаторах переменное напряжение на катушке с насыщенным стальным сердечником почти не изменяется даже при значительных изменениях величины протекающего по катушке переменного тока. Это явление объясняется тем, что в области насыщения даже значительные изменения тока вызывают лишь незначительные изменения магнитного потока, а следовательно, и напряжения на дросселе, которое пропорционально изменению магнитного потока.

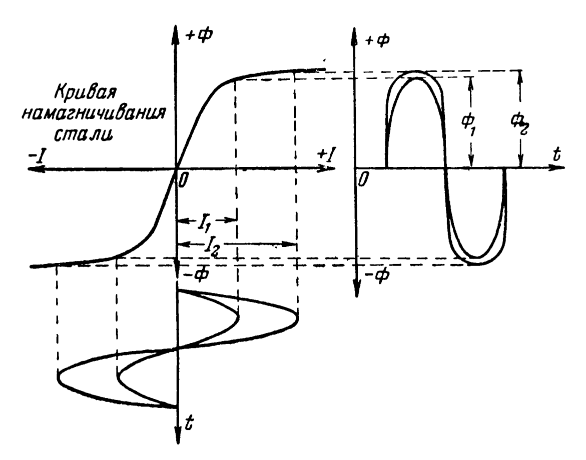
На фиг. 4 показано, как изменяется магнитный поток Ф в области насыщения в зависимости от намагничивающего переменного тока *I*. Увеличение амплитуды намагничивающего тока на 100% вызывает увеличение амплитуды магнитного потока только на 7%.

Пользуясь известным соотношением

$$U_{\partial p} = I \cdot 2\pi f L,$$

можно сказать, что с увеличением тока I через дроссель индуктивность L падает, чем и объясняется незначительное возрастание напряжения $U_{др}$ на дросселе.

Для использования указанного свойства дроссель или трансформатор с насыщенным сердечником, т. е. нелинейный элемент, соединяют последовательно с дросселем с ненасыщенным сердечником или активным сопротивлением, т. е. с линейным элементом (фиг. 5). Напря-



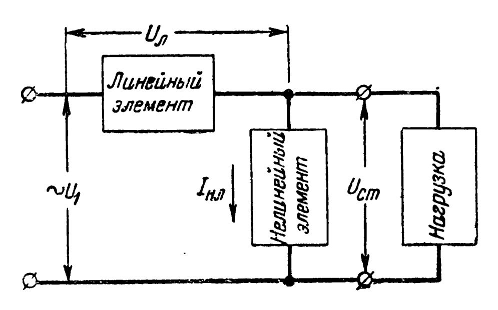
Фиг. 4. Зависимость магнитного потока Ф от намагничивающего тока I в дросселе с насыщенным сердечником.

жение на нелинейном элементе, а следовательно, и на нагрузке, будет мало меняться при изменениях тока через нелинейный элемент, вызванных колебаниями питающего напряжения.

Процесс стабилизации напряжения в устройстве схемы фиг. 5 иллюстрируется графиком фиг. 6. На графике приведены зависимости напряжения $U_{л}$ на линейном элементе, напряжения $U_{ст}$ на нелинейном элементе и суммарного напряжения U_1 на входе от тока $I_{нл}$ через нелинейный элемент. Если напряжение сети изобразить отрезком *аг*, то из графика видно, что часть этого напряжения (*аб*) падает на линейном элементе (например, на ненасыщенном дросселе), а остаток напряжения (*бг*=*ав*) — на нелинейном элементе (на насыщенном дросселе) и

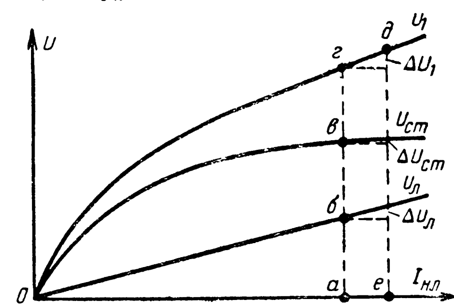
создаст через него ток, достаточный для возникновения в сердечнике потока насыщения.

При повышении напряжения сети на величину ΔU_1 суммарное напряжение изобразится отрезком *де*. Бóльшая часть этого приращения ($\Delta U_л$) упадет на обмотке нена-



Фиг. 5. Блок-схема простейшего электромагнитного стабилизатора напряжения.

сыщенного дросселя, а следовательно, напряжение на насыщенном дросселе (и на нагрузке) возрастет на величину $\Delta U_{ст}$, значительно меньшую, чем ΔU_1.



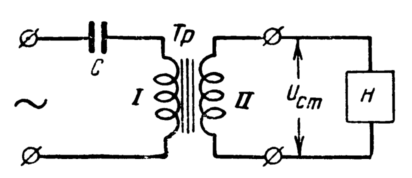
Фиг. 6. График, поясняющий работу электромагнитного стабилизатора напряжения.

При уменьшении напряжения сети падение напряжения на ненасыщенном дросселе уменьшится на бóльшую величину, чем на насыщенном, в результате чего напряжение на выходе стабилизатора изменится незначительно.

К электромагнитным стабилизаторам относятся также так называемые феррорезонансные стабилизаторы, использующие для улучшения стабилизации резонансные явления в цепях, содержащих сталь. В схему феррорезонансного стабилизатора включается последовательно или параллельно насыщенному дросселю конденсатор. Улучшение стабилизирующей способности устройства при наличии емкости объясняется резонансными явлениями, вызывающими более резкое изменение тока че-

рез цепь, содержащую насыщенный дроссель, и как следствие уменьшение изменения напряжения на нем.

Схема феррорезонансного стабилизатора с последовательно включенной емкостью *C* приведена на фиг. 7. В этой схеме используется насыщенный трансформатор *Тр* со вторичной обмоткой *II*, напряжение которой выбирается равным напряжению на нагрузке *Н* стабилизатора. Схема фиг. 7, использующая последовательный резонанс (резонанс напряжений), имеет невысокий к. п. д. и малый $\cos\varphi$. Она применяется сравнительно редко для питания маломощных устройств (например, измерительной аппаратуры)[1]. Значительно чаще применяются устройства с параллельно включенной емкостью, использующие явление параллельного резонанса или резонанса токов.



Фиг. 7. Схема простейшего феррорезонансного стабилизатора напряжения.

Электромагнитные стабилизаторы применяются только для стабилизации переменного напряжения и изготовляются на различные мощности до 1—2 *квт*. Они могут поддерживать выходное напряжение с точностью 0,5—1%, обладают сравнительно высоким к. п. д. (70—80%) и практически безинерционны. К их достоинствам следует отнести также надежность, бесшумность работы и отсутствие движущихся частей.

Серьезным недостатком электромагнитных стабилизаторов является зависимость выходного напряжения от частоты сети: изменение частоты сети на 1—2% вызывает изменение выходного напряжения на 1—3%. К числу недостатков следует также отнести искажение формы кривой стабилизованного напряжения (что следует учитывать при расчете выпрямителей), изменение степени стабилизации в зависимости от величины и характера нагрузки (индуктивной или емкостной), малый коэффициент мощности ($\cos\varphi$) из-за большой величины реактивного тока и значительное магнитное поле рассеяния, что во многих случаях делает невозможным помещение стабилизаторов в одном блоке с приемным или усилительным устройством.

---

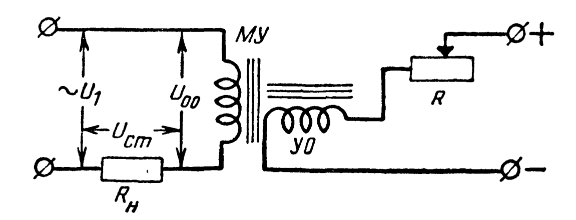
[1] Расчет этой схемы приведен в статье А. Юрьева, Расчет феррорезонансного стабилизатора напряжения, „Радио“, 1951, № 10.

Более подробно различные схемы электромагнитных стабилизаторов рассматриваются в дальнейшем.

В стабилизаторах третьей группы (с магнитными усилителями) также используются нелинейные свойства насыщенного стального сердечника. Однако в отличие от электромагнитных стабилизаторов, в которых переменное напряжение на насыщенном дросселе поддерживается неизменным, напряжение на обмотке магнитного усилителя стабилизатора третьей группы изменяется в процессе работы.

Действие магнитного усилителя основано на том, что магнитная проницаемость стали, а следовательно, и индуктивность дросселя, изменяется при подмагничивании сердечника постоянным током. При увеличении подмагничивающего тока индуктивность дросселя падает, а при уменьшении — возрастает.

Магнитный усилитель *МУ* имеет две обмотки, одна из которых (основная) включается последовательно с нагруз-



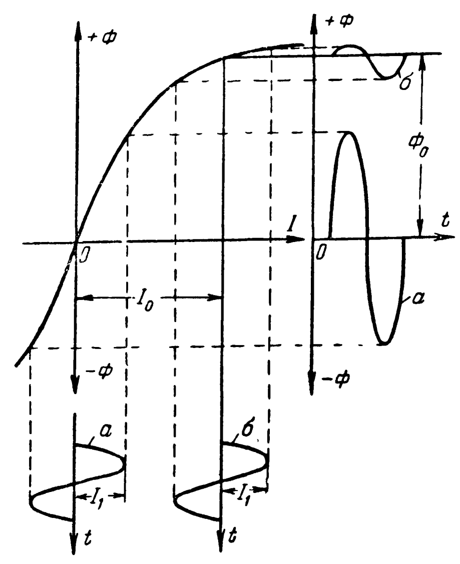
Фиг. 8. Принципиальная схема включения магнитного усилителя (дросселя насыщения).

кой, а другая (подмагничивающая или управляющая) подключается к источнику постоянного напряжения (фиг. 8). Если изменять величину постоянного тока, протекающего через управляющую обмотку *УО*, то будет изменяться индуктивное сопротивление основной обмотки *ОО*, а следовательно, и падение напряжения на ней. Регулируя соответствующим образом величину подмагничивающего тока (реостатом *R*), можно, изменяя падение напряжения на основной обмотке U_{oo}, компенсировать колебания напряжения питающей сети U_1, поддерживая напряжение $U_{ст}$ на нагрузке $R_н$ почти постоянным. При этом для управления значительной мощностью в нагрузке требуется очень небольшая мощность постоянного подмагничивающего тока. Таким образом, магнитный усилитель можно рассматривать

как усилитель мощности. В литературе магнитные усилители, работающие в схемах стабилизаторов напряжения, иногда называют дросселями насыщения.

Следует отметить, что конструкция магнитопровода и расположение катушек магнитных усилителей обеспечивают отсутствие переменной э. д. с. в управляющей обмотке. Конструкции магнитных усилителей описаны ниже.

Влияние подмагничивающего тока в управляющей обмотке на изменение напряжения на обмотке переменного тока (основной) иллюстрируется графиком фиг. 9. На графике показана зависимость магнитного потока Ф от времени t при отсутствии и наличии постоянного подмагничивающего тока I_0 для одного и того же значения переменного тока I_1, протекающего через основную обмотку.



Фиг. 9. График изменения переменной составляющей магнитного потока в зависимости от постоянного подмагничивания.

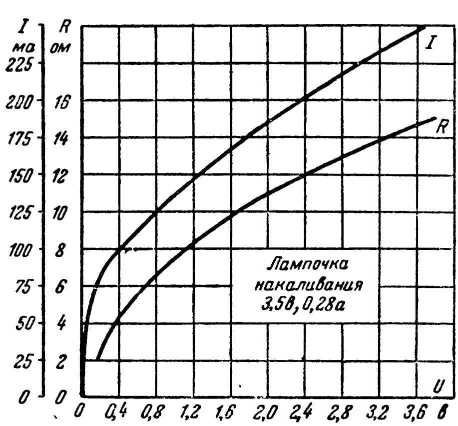
Из графика видно, что при $I_0 = 0$ (кривая *а*) магнитный поток зависит только от величины переменного тока и не имеет постоянной составляющей. В этом случае амплитуда изменения магнитного потока максимальна и э. д. с., наводимая потоком в основной обмотке, имеет максимальное значение. При наличии постоянного подмагничивания (кривая *б*) появляется постоянная составляющая магнитного потока Φ_0, уменьшается амплитуда переменного магнитного потока и соответственно уменьшается э. д. с., наводимая в основной обмотке. Это равносильно уменьшению падения напряжения на основной обмотке или, что то же, уменьшению ее индуктивности.

При увеличении подмагничивающего тока будет происходить дальнейшее уменьшение э. д. с., а следова-

тельно, и падения напряжения на обмотке переменного тока.

Следует отметить, что кривая магнитного потока несинусоидальна и форма ее зависит от величины подмагничивающего тока. Это приводит к искажению формы кривой напряжения на нагрузке.

Свойство магнитных усилителей изменять индуктивность при подмагничивании постоянным током широко используется в устройствах автоматического регулирования, в частности в стабилизаторах напряжения. Магнитный усилитель можно использовать также и для стабилизации постоянного напряжения. Ниже рассматриваются несколько схем стабилизаторов с магнитными усилителями.



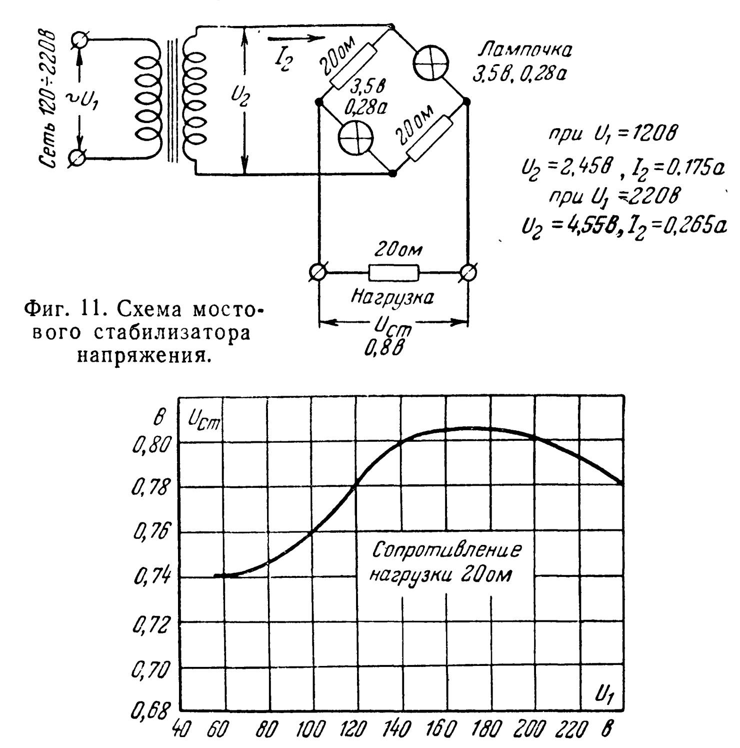
Фиг. 10. Зависимость величины тока и сопротивления лампочки накаливания (3,5 *в*, 0,28 *а*) от приложенного напряжения.

К четвертой группе стабилизаторов относится довольно большое количество устройств, использующих характерные свойства бареттеров, ламп тлеющего и коронного разряда (газовых стабилизаторов), ламп накаливания (с вольфрамовой и угольной нитью), твердых выпрямителей (купроксных, селеновых, германиевых), а также специальных тиритовых сопротивлений. Как известно, все эти элементы, называемые нелинейными, не подчиняются закону Ома, так как их сопротивление зависит от приложенного к ним напряжения (фиг. 10).

В дальнейшем мы подробно познакомимся со схемами, в которых применяются бареттеры и газовые стабилизаторы напряжения. Здесь же в качестве примера укажем на мостовую схему стабилизатора, в которой в качестве нелинейных элементов использованы лампочки накаливания от карманного фонаря (фиг. 11). Зависимость стабилизованного напряжения от напряжения сети для схемы фиг. 11 приведена на фиг. 12. Стабилизация в данной схеме осуществ-

ляется в пределах изменений напряжения сети примерно от 100 до 240 *в*.

Такой стабилизатор может быть использован как эталон переменного напряжения, необходимый, например, для градуирования измерительного осциллоскопа или для других



Фиг. 11. Схема мостового стабилизатора напряжения.

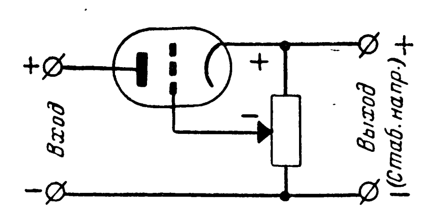
Фиг. 12. Зависимость стабилизованного напряжения от напряжения сети для схемы мостового стабилизатора фиг. 11.

целей. В качестве нелинейных элементов можно использовать также нити накала электронных ламп (подогреватели), твердые выпрямители, бареттеры и т. д.

Схемы мостовых стабилизаторов с различными нелинейными элементами применяются для стабилизации как переменного, так и постоянного напряжения. Эти схемы используются обычно в маломощных измерительных устройствах, так как они обладают очень низким к. п. д. (5—10%).

Схемы, в которых применяются бареттеры и лампы накаливания, обладают инерционностью и не сразу реагируют на внезапное изменение напряжения сети. Это объясняется тем, что нить бареттера или лампы требует некоторого времени для своего прогрева.

К пятой группе стабилизаторов (электронных) относятся широко распространенные схемы, в которых процесс регулирования осуществляется с помощью электронных ламп. Электронные стабилизаторы могут обеспечить наиболее высокие степени стабильности по сравнению со стабилизаторами других групп. Кроме того, они устойчивы в работе, безинерционны и малочувствительны к смене отдельных элементов схемы (ламп, сопротивлений и т. д.). Большинство электронных стабилизаторов напряжения обладает весьма малым внутренним сопротивлением (единицы — десятки ом) и поэтому хорошо поддерживают выходное напряжение при изменениях тока нагрузки.



Фиг. 13. Простейшая схема электронного стабилизатора напряжения.

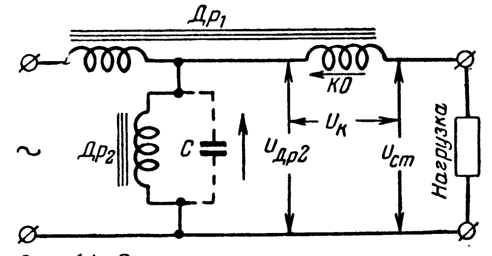
Электронные стабилизаторы предназначены для стабилизации постоянного напряжения или тока, источником которого служит обычно выпрямитель или сеть постоянного тока. Принцип действия электронного стабилизатора напряжения можно объяснить на примере простейшей схемы фиг. 13. С увеличением напряжения на входе стабилизатора возрастает отрицательное напряжение на сетке регулирующей лампы; ее сопротивление для постоянного тока возрастает и на ней падает почти весь избыток входного напряжения. При уменьшении входного напряжения падение на регулирующей лампе соответственно уменьшается. В результате напряжение на выходе стабилизатора изменяется незначительно.

Электронные стабилизаторы широко применяются в различных радиотехнических устройствах. Радиолюбителю, желающему устранить в своем приемнике ненормальности, вызываемые колебаниями напряжения сети, нетрудно будет рассчитать и собрать схему электронного стабилизатора, пользуясь настоящей брошюрой. В дальнейшем подробно

рассматриваются наиболее употребительные схемы электронных стабилизаторов напряжения и тока и приводятся примеры их расчета.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ

Электромагнитный стабилизатор напряжения с компенсационной обмоткой. Схема стабилизатора с разделенными дросселями с ненасыщенным и насыщенным сердечником, показанная на блок-схеме фиг. 5, применяется сравнительно редко, так как напряжение на насыщенном дросселе (нелинейном элементе) все же заметно изменяется при изменении напряжения сети. Для того чтобы уменьшить это изменение применяется так называемая компенсационная обмотка, намотанная на ненасыщенном дросселе и включенная между насыщенным дросселем и нагрузкой. Напряжение компенсационной обмотки $U_к$ направлено навстречу напряжению на насыщенном дросселе $U_{Др_2}$ и меньше его по величине.

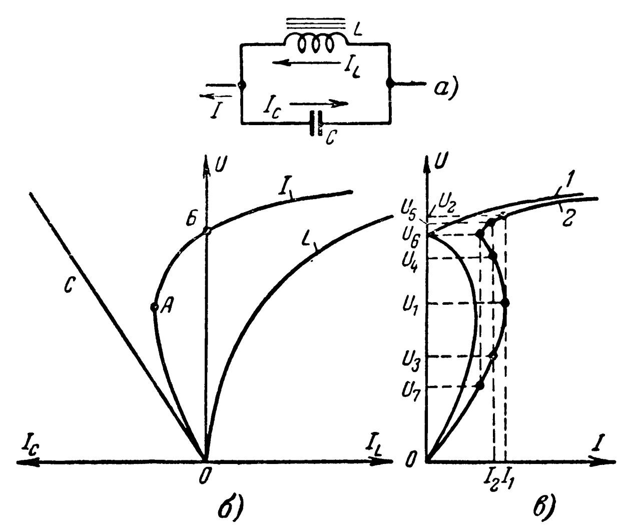


Фиг. 14. Схема электромагнитного стабилизатора с компенсационной обмоткой.

Схема такого стабилизатора приведена на фиг. 14. При повышении напряжения сети ток, протекающий через компенсационную обмотку *КО*, возрастет, увеличивая напряжение, индуктируемое в этой обмотке. Так как напряжение $U_к$ направлено противоположно напряжению $U_{Др_2}$ на насыщенном дросселе $Др_2$, то при надлежащем выборе числа витков компенсационной обмотки общее напряжение $U_{ст}$ на нагрузке увеличится весьма незначительно. Понижение напряжения сети вызовет уменьшение напряжения $U_к$, в результате чего напряжение на нагрузке упадет на величину, заметно меньшую, чем в схеме без компенсационной обмотки.

Основными недостатками схемы фиг. 14 и ей подобных являются большие потери (малый к. п. д.), малый $\cos\varphi$, невысокая стабильность выходного напряжения, зависящая от характера нагрузки, и большой расход материалов.

Феррорезонансный стабилизатор напряжения с разделенными ненасыщенным и насыщенным дросселями. Значительно лучшие результаты дает схема феррорезонансного стабилизатора, у которого параллельно дросселю с насыщенным сердечником включен конденсатор C (пунктир на фиг. 14), образующий с этим дросселем параллельный резонансный контур, настроенный на частоту,



Фиг. 15. Зависимость напряжения на параллельном контуре с насыщенным дросселем от тока через контур.

близкую к частоте сети. Очевидно, что резонансная частота этого контура $f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ будет изменяться при изменениях тока через дроссель, так как индуктивность насыщенного дросселя L зависит от протекающего через него тока (L уменьшается при увеличении тока).

Рассмотрим процессы, происходящие в параллельном контуре с насыщенным дросселем (фиг. 15,*а*) несколько подробнее. До наступления насыщения ток через дроссель I_L увеличивается почти пропорционально напряжению, а в области насыщения даже небольшой прирост напряжения вызывает значительное увеличение тока (кривая L на фиг. 15,*б*). Ток через конденсатор I_C, как из-

вестно, изменяется пропорционально напряжению; по фазе этот ток противоположен току через дроссель (кривая *C* на фиг. 15,*б*).

Ток в общей (неразветвленной) цепи представляет собой алгебраическую сумму токов обеих ветвей (кривая *I* на фиг. 15,*б*). При малых напряжениях на контуре общий ток *I* имеет емкостный характер и с увеличением напряжения возрастает до точки *А*. Затем он начинает уменьшаться и доходит до нуля в точке *Б*, которая соответствует резонансу токов в контуре. При дальнейшем увеличении напряжения ток снова начинает расти, но имеет уже индуктивный характер, что свидетельствует об опрокидывании фазы в точке резонанса.

Если участок *ОАБ* вольтамперной кривой повернуть на 180° относительно вертикальной оси, то получим кривую зависимости тока *I* от напряжения на контуре безотносительно к фазе тока (кривая *1* на фиг. 15,*в*).

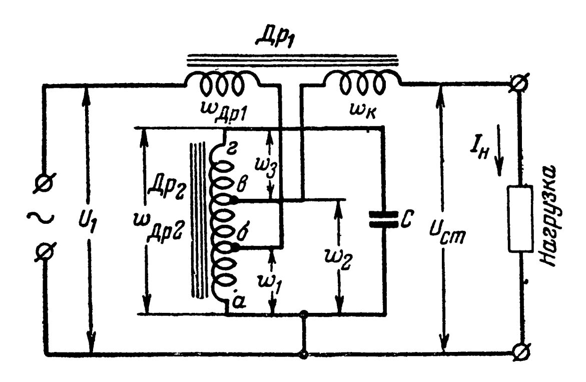
Все приведенные рассуждения были сделаны в предположении, что контур не имеет потерь. В реальном контуре ток *I* в момент резонанса не будет равен нулю и вольтамперная характеристика (кривая зависимости тока от напряжения) сместится вправо (кривая *2* на фиг. 15,*в*) на величину, характеризующую в некотором масштабе активные потери контура. Из этой кривой видно, что при токах, равном и меньших I_1 каждому значению тока соответствуют два или три значения напряжения на контуре: току I_1 соответствуют напряжения U_1 и U_2, а току I_2 — напряжения U_3, U_4 и U_5. При токах, больших I_1, каждому значению тока соответствует только одно значение напряжения.

Эта многозначность напряжений говорит о неустойчивости процессов в некоторой области при феррорезонансе. Очевидно, что неустойчивой областью будет область, соответствующая токам, меньшим чем I_1. Действительно, если ток будет расти от нуля, то напряжение на контуре будет также увеличиваться от нуля до U_1, затем скачком возрастет до U_2, после чего рост напряжения будет плавным. При уменьшении тока напряжение на контуре будет плавно уменьшаться до величины U_6, затем скачком — до величины U_7, после чего будет плавно падать до нуля.

Таким образом, стабилизатор по схеме фиг. 14 сможет устойчиво работать только в том случае, если ток *I* в общей цепи контура не будет падать ниже величины I_1. При этом даже значительное увеличение тока *I* (вследствие увеличе-

ния напряжения на входе стабилизатора) вызовет незначительный прирост напряжения на контуре.

Если сравнить рабочие участки кривых фиг. 15, то можно заметить, что при одинаковых изменениях тока изменение напряжения U на контуре (кривая *1* или *2*) меньше, чем на одной лишь катушке (кривая L). Это говорит о лучших стабилизирующих свойствах феррорезонансной схемы по сравнению со схемой с насыщенным дросселем, но без емкости.

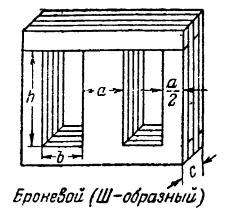


Фиг. 16. Схема феррорезонансного стабилизатора напряжения.

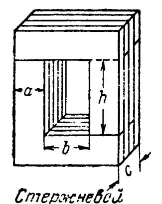
В практическом выполнении схема стабилизатора с разделенными ненасыщенным и насыщенным дросселями изображена на фиг. 16. В этой схеме обмотка $w_{Др_2}$ насыщенного дросселя $Др_2$ выполнена в виде повышающего автотрансформатора. Напряжение, подводимое к обмотке w_1, равно напряжению сети минус падение напряжения на основной обмотке $w_{Др_1}$ ненасыщенного дросселя $Др_1$. Обмотка w_2, частью которой является обмотка w_1, образует вторичную (выходную) обмотку автотрансформатора. Последовательно с ней включена компенсационная обмотка $w_к$, намотанная на сердечнике ненасыщенного дросселя. Напряжение компенсационной обмотки направлено противоположно напряжению вторичной обмотки. Дополнительная обмотка w_3 позволяет уменьшить емкость C, величина которой обратно пропорциональна квадрату полного напряжения автотрансформатора.

Таблица 1

Типы сердечников и их основные данные



Броневой (Ш-образный)



Стержневой

Данные	Для броневого сердечника	Для стержневого сердечника
Сечение стали	$Q_c = 0{,}9ac$	$Q_c = 0{,}9ac$
Сечение окна	$Q_o = bh$	$Q_o = bh$
Средняя длина магнитной силовой линии	$l_c = 2(b+h) + \pi \frac{a}{2}$	$l_c = 2(b+h) + \pi a$
Средняя длина витка обмотки	$l_м = 2(a+c) + \pi b$	$l_м = 2(a+c) + \pi \frac{b^*}{2}$
Средняя длина магнитной силовой линии для переменного магнитного потока**	$l_\sim = 2(a+2b+h) + \pi \frac{a}{2}$	$l_\simeq = l_c = 2(b+h) + \pi a$
То же для постоянного магнитного потока**	$l_o = l_c = 2(b+h) + \pi \frac{a}{2}$	$l_o = l_c = 2(b+h) + \pi a$
Объем стали для переменного магнитного потока**	$V_\sim = 0{,}9 \frac{a}{2} l_\sim c$	$V_\sim = 0{,}9\, a l_\sim c$

Размеры некоторых броневых (Ш-образных) сердечников

Тип пластин	a, *см*	b, *см*	h, *см*	Q_c, *см*^{2}	Q_o, *см*^{2}	l_c, *см*	$l^{**}_\sim$, *см*	l^{**}_o, *см*	$V^{**}_\sim$ *см*^{3}
Ш-12	1,2	1,2	2,6	1,1c	3,1	9,5	14,3	9,5	7,7c
Ш-16***	1,6	1,6	2,4	1,5c	3,8	10,5	16,9	10,5	12,2c
Ш-16	1,6	1,6	3,8	1,5c	6,1	13,4	19,7	13,4	14,2c
Ш-20***	2	2	3	1,8c	6	13,1	21,1	13,1	19c
Ш-20	2	2	5	1,8c	10	17,1	25,1	17,1	22,6c
Ш-25	2,5	2,5	6,25	2,3c	15,6	21,4	31,4	21,4	35,4c
Ш-32	3,2	3,2	8	2,9c	25,6	27,4	40,2	27,4	57,8c
Ш-40	4	4	10	3,6c	40	34,3	50,3	34,3	90,5c

* Для трансформатора с двумя катушками.
** Данные для расчета дросселей насыщения.
*** Сердечники с малым окном. Рекомендуется применять только для дросселей сглаживающих фильтров.

Отношение толщины пакета сердечника c к ширине стержня a рекомендуется брать в пределах от 1 до 2,5.

Пример 1. Рассмотрим порядок приближенного расчета стабилизатора (по схеме фиг. 16) мощностью $P=200$ *вт* для сети с напряжением $U_1=220$ *в* при выходном стабилизованном напряжении $U_{ст}=220$ *в*.

1. Сечение сердечника автотрансформатора $Q_{Др_2}$ определяется в зависимости от мощности стабилизатора P:

$$Q_{Др_2}=1{,}3\sqrt{P}=1{,}3\sqrt{200}=18{,}5\ см^2.$$

2. Число витков первичной обмотки w_1 автотрансформатора (полагая индукцию в сердечнике $B=16\,000$ *гс*, частоту сети $f=50$ *гц* и напряжение на обмотке w_1 равным $0{,}6U_1$) подсчитывается по формуле

$$w_1=16{,}4\frac{U_1}{Q_{Др_2}}=16{,}4\frac{220}{18{,}5}=195\ \text{витков}.$$

3. Число витков вторичной обмотки

$$w_2=28{,}2\frac{U_{ст}}{Q_{Др_2}}=28{,}2\frac{220}{18{,}5}=336\ \text{витков}.$$

4. Емкость конденсатора C выбирается в зависимости от мощности стабилизатора. При мощности до 100 *вт* емкость должна быть не менее 4 — 6 *мкф*, а при мощности от 100 до 250 *вт* не менее 8 *мкф*. Электролитические конденсаторы в этой схеме применять нельзя.

В данном случае выбираем емкость конденсатора $C=8$ *мкф*.

5. Размеры пластин сердечника автотрансформатора (см. табл. 1) желательно выбрать так, чтобы отношение толщины пакета сердечника c к ширине стержня a (для Ш-образных пластин — к ширине среднего стержня) было в пределах от 1 до 2,5.

В данном примере можно выбрать стандартную пластину типа Ш-32; тогда отношение толщины пакета к ширине стержня будет равно

$$\frac{c}{a}=\frac{Q_{Др_2}}{0{,}9a^2}=\frac{18{,}5}{0{,}9\cdot 3{,}2^2}=2,$$

что приемлемо.

Средняя длина магнитной силовой линии сердечника l_c для пластины Ш-32 составляет 27,4 *см*.

6. Общее число витков автотрансформатора $w_{Др_2}$ вычисляется по формуле

$$w_{Др_2}=2\,000\sqrt{\frac{l_c}{CQ_{Др_2}}}=2\,000\sqrt{\frac{27{,}4}{8\cdot 18{,}5}}=860\ \text{витков}.$$

7. Рабочее напряжение конденсатора C определяется из приближенной формулы

$$U_{раб}\geqslant 1{,}6\,U_{ст}\frac{w_{Др_2}}{w_2}=1{,}6\cdot 220\frac{860}{336}=900\ в.$$

Выбираем $U_{раб}=1\,000$ *в*. Если $U_{раб}$ получается больше 1 000 *в*, то рекомендуется увеличить емкость конденсатора C.

8. Число витков дополнительной обмотки

$$w_3 = w_{Др_2} - w_2 = 860 - 336 = 524 \text{ витка.}$$

9. Ток нагрузки стабилизатора

$$I_н = \frac{P}{U_{ст}} = \frac{200}{220} = 0{,}91 \ a.$$

10. Диаметры проводов обмоток автотрансформатора выбираются из расчета плотности тока не более 2 *а/мм²*. При этом диаметры проводов без изоляции будут равны:

для участка *аб* (w_1)

$$d_1 = 1{,}5\sqrt{I_н} = 1{,}5\sqrt{0{,}91} = 1{,}43 \ мм;$$

для участка *бв* ($w_2 - w_1$)

$$d_2 = 1{,}27\sqrt{I_н} = 1{,}27\sqrt{0{,}91} = 1{,}21 \ мм;$$

для участка *вг* (w_3)

$$d_3 = 1{,}13\sqrt{I_н} = 1{,}13\sqrt{0{,}91} = 1{,}08 \ мм.$$

Ближайшие стандартные диаметры:

$$d_1 = 1{,}45 \ мм; \quad d_2 = 1{,}25 \ мм; \quad d_3 = 1{,}08 \ мм.$$

11. Для расчета ненасыщенного дросселя следует предварительно задаться размером пластины его сердечника и определить площадь окна сердечника Q_o.

Для данного примера выбираем также пластины типа Ш-32 с площадью окна 25,6 *см²* (см. табл. 1).

12. Диаметр провода основной обмотки $w_{Др_1}$ ненасыщенного дросселя

$$d_4 = 1{,}8\sqrt{\frac{P}{U_1}} = 1{,}8\sqrt{\frac{200}{220}} = 1{,}72 \ мм.$$

Ближайший стандартный диаметр $d_4 = 1{,}68$ *мм*.

Если дроссель выполнить из провода с эмалевой изоляцией, то диаметр провода с изоляцией составит

$$d_{4из} = 1{,}74 \ мм.$$

13. Число витков основной обмотки находим из выражения

$$w_{Др_1} = \frac{0{,}7Q_o \cdot 10^2}{d_{4из}^2 1{,}3} = \frac{0{,}7 \cdot 25{,}6 \cdot 10^2}{1{,}74^2 \cdot 1{,}3} = 455 \text{ витков.}$$

14. Площадь сечения сердечника ненасыщенного дросселя определяется из выражения

$$Q_{Др_1} = 34\frac{U_1}{w_{Др_1}} = 34\frac{220}{455} = 17 \ см^2.$$

Отношение толщины пакета к ширине стержня составляет

$$\frac{c}{a} = \frac{Q_{Др_1}}{0{,}9a^2} = \frac{17}{0{,}9 \cdot 3{,}2^2} = 1{,}85,$$

что приемлемо

15. Число витков компенсационной обмотки

$$w_k = 0{,}2 w_{Др_1} \frac{U_{cm}}{U_1} = 0{,}2 \cdot 455 \frac{220}{220} = 91 \text{ виток.}$$

16. Диаметр провода компенсационной обмотки (без изоляции)

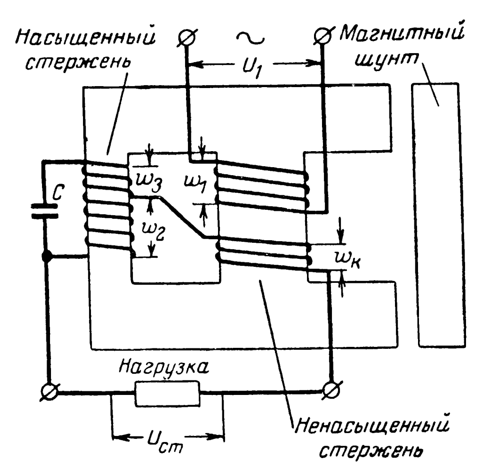
$$d_5 = 0{,}8 \sqrt{I_н} = 0{,}8 \sqrt{0{,}91} = 0{,}77 \text{ мм.}$$

Ближайший стандартный диаметр

$$d_5 = 0{,}74 \text{ мм.}$$

17. Сборку дросселя с ненасыщенным сердечником производят впритык с воздушным зазором, который выполняется в виде полоски картона толщиной 1,5 — 2 *мм*. Толщина полоски окончательно уточняется при регулировке стабилизатора.

Феррорезонансный стабилизатор напряжения на одном сердечнике с магнитным шунтом. Феррорезонансный стабилизатор напряжения можно также сконструировать, разместив его на одном общем трехстержневом сердечнике. Схема такого стабилизатора изображена на фиг. 17.



Фиг. 17. Схема феррорезонансного стабилизатора напряжения с трехстержневым сердечником.

Первичная обмотка w_1 изолирована от других обмоток и расположена на среднем ненасыщенном стержне. На этом же стержне располагается компенсационная обмотка $w_к$. На левом стержне, имеющем меньшее сечение, а потому

работающем в режиме насыщения, расположены вторичная (выходная) обмотка w_2 и дополнительная обмотка w_3, соединенные последовательно. Роль ненасыщенного дросселя в этой схеме выполняет индуктивность рассеяния первичной обмотки.

Правый стержень, называемый магнитным шунтом, отделен от остальной части сердечника воздушным зазором, представляющим для магнитного потока сопротивление во много раз большее, чем материал сердечника. Изменяя величину воздушного зазора, можно перераспределять магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой w_1 в среднем стержне, между магнитным шунтом и насыщенным (левым) стержнем; это явление используется при регулировке стабилизатора.

Изменение напряжения сети не вызывает заметного изменения напряжения во вторичной обмотке w_2, расположенной на насыщенном стержне, так как магнитный поток в насыщенном стержне изменяется незначительно. Изменение величины магнитного потока будет происходить, в основном, в магнитном шунте. Небольшие изменения напряжения вторичной обмотки будут скомпенсированы встречным напряжением компенсационной обмотки $w_к$. В некоторых схемах компенсационная обмотка располагается на стержне магнитного шунта.

Пример 2. Рассмотрим порядок приближенного расчета стабилизатора напряжения (по схеме фиг. 17) для нагрузки мощностью $P=60$ *вт* (приемник) при напряжении сети $U_1 = 120$ *в* и выходном стабилизованном напряжении $U_{ст} = 120$ *в*.

1. Электродвижущая сила одного витка первичной обмотки при номинальном напряжении сети (для частоты сети $f = 50$ *гц*)

$$e_0 = 0{,}035\sqrt{P} = 0{,}035\sqrt{60} = 0{,}27 \text{ вольт/виток.}$$

2. Сечение стали ненасыщенного (среднего) стержня определяется по формуле

$$Q_1 = 36e_0 = 36 \cdot 0{,}27 = 9{,}7 \text{ см}^2.$$

3. Сечение стали насыщенного стержня

$$Q_2 = 0{,}59\,Q_1 = 0{,}59 \cdot 9{,}7 = 5{,}7 \text{ см}^2.$$

4. Сечение стали магнитного шунта

$$Q_ш = 0{,}4Q_1 = 0{,}4 \cdot 9{,}7 = 3{,}85 \text{ см}^2.$$

5. Выбираем конденсатор с рабочим напряжением $U_{раб} = 600$ *в*. Тогда допустимое переменное напряжение на конденсаторе определяется как

$$U_c = 0{,}65U_{раб} = 0{,}65 \cdot 600 = 390 \text{ в.}$$

6. Емкость конденсатора находим из выражения

$$C = 10\,000 \frac{P}{U_c^2} = 10\,000 \cdot \frac{60}{390^2} = 4 \text{ мкф}.$$

7. Число витков первичной обмотки

$$w_1 = \frac{U_1}{e_0} = \frac{120}{0{,}27} = 445 \text{ витков}.$$

8. Число витков вторичной обмотки

$$w_2 = 1{,}43 \frac{U_{cm}}{e_0} = 1{,}43 \cdot \frac{120}{0{,}27} = 635 \text{ витков}.$$

9. Число витков компенсационной обмотки

$$w_к = 0{,}15 w_2 = 0{,}15 \cdot 635 = 95 \text{ витков}.$$

10. Число витков дополнительной обмотки

$$w_3 = 1{,}18 \frac{U_c}{e_0} - w_2 = 1{,}18 \frac{390}{0{,}27} - 635 = 1\,065 \text{ витков}.$$

11. Ток первичной обмотки

$$I_1 = \frac{2P}{U_1} = \frac{2 \cdot 60}{120} = 1 \ a.$$

12. Ток дополнительной обмотки

$$I_3 = 1{,}5 \frac{P}{U_c} = 1{,}5 \frac{60}{390} = 0{,}23 \ a.$$

13. Ток компенсационной обмотки

$$I_к = I_н = \frac{P}{U_{cm}} = \frac{60}{120} = 0{,}5 \ a.$$

14. Ток вторичной обмотки

$$I_2 = \sqrt{I_к^2 + I_3^2} = \sqrt{0{,}5^2 + 0{,}23^2} = 0{,}55 \ a.$$

15. Диаметры проводов обмоток (без изоляции):
первичной

$$d_1 = 0{,}8\sqrt{I_1} = 0{,}8\sqrt{1} = 0{,}8 \text{ мм};$$

дополнительной

$$d_3 = 0{,}9\sqrt{I_3} = 0{,}9\sqrt{0{,}23} = 0{,}43 \text{ мм};$$

компенсационной

$$d_к = 0{,}8\sqrt{I_к} = 0{,}8\sqrt{0{,}5} = 0{,}57 \text{ мм};$$

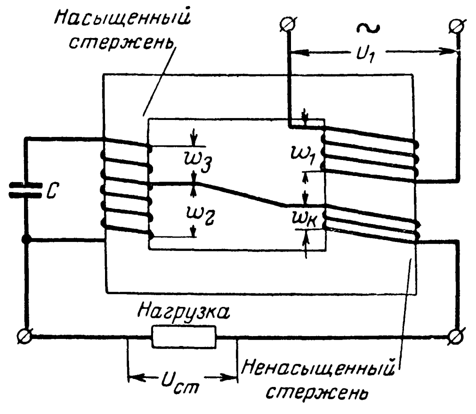
вторичной

$$d_2 = 0{,}9\sqrt{I_2} = 0{,}9\sqrt{0{,}55} = 0{,}67 \text{ мм}.$$

16. Воздушный зазор между сердечником и магнитным шунтом должен составлять 1,5 — 2 *мм*. Эта величина уточняется при регулировке стабилизатора.

17. Для сборки стабилизатора по схеме фиг. 17 можно использовать обычные Ш-образные пластины после соответствующей их обрезки. При этом ширина пластины крайнего (насыщенного) стержня должна составлять 0,6, а ширина магнитного шунта 0,4 от ширины пластины среднего (ненасыщенного) стержня. Для получения указанных соотношений обычно приходится частично обрезать полосы, составляющие средний стержень, и полностью срезать одну из двух крайних полос (на высоту окна). Если магнитный шунт изготовляется из полос, составляющих ярмо Ш-образного сердечника, то их тоже надо частично обрезать. Отношение толщины пакета сердечника к ширине среднего стержня рекомендуется иметь в пределах 1 — 2,5.

Феррорезонансный стабилизатор напряжения без магнитного шунта. Дальнейшим упрощением конструкции стабилизатора является использование двухстержневого сердечника без магнитного шунта. Схема такого стабилизатора приведена на фиг. 18. Один стержень имеет большое сечение и, следовательно, не насыщен, а другой — меньшее сечение и поэтому насыщен.



Фиг. 18. Схема феррорезонансного стабилизатора напряжения без магнитного шунта.

На ненасыщенном стержне расположены первичная w_1 и компенсационная $w_к$ обмотки. На насыщенном стержне расположена вторичная w_2 и дополнительная w_3 обмотки. Роль ненасыщенного дросселя, как и в схеме фиг. 17, выполняет индуктивность рассеяния первичной обмотки. Таким образом, по сравнению со схемой фиг. 17 схема фиг. 18 отличается только отсутствием регулирующего элемента — магнитного шунта.

В схеме фиг. 18, как и в предыдущих схемах феррорезонансных стабилизаторов напряжения, магнитный поток в насыщенном стержне будет изменяться незначительно, а сле-

довательно, незначительно будет изменяться и напряжение вторичной обмотки. Изменения магнитного потока, вызванные колебаниями напряжения питающей сети, будут происходить в основном за счет изменений магнитного потока рассеяния, замыкающегося через воздух, который в данной схеме играет роль магнитного шунта.

Пример 3. В качестве примера приближенного расчета стабилизатора по схеме фиг. 18 рассмотрим расчет стабилизатора мощностью $P = 120$ *вт* с выходным напряжением $U_{ст} = 220$ *в* при напряжении питающей сети $U_1 = 220$ *в*.

1. Сечение стали ненасыщенного стержня определяется из выражения

$$Q_1 = 1{,}1\sqrt{P} = 1{,}1\sqrt{120} = 12{,}1 \ см^2.$$

2. Сечение стали насыщенного стержня

$$Q_2 = \frac{Q_1}{1{,}65} = \frac{12{,}1}{1{,}65} = 7{,}35 \ см^2.$$

3. Электродвижущая сила одного витка первичной обмотки (при частоте сети $f = 50$ *гц* и индукции $B = 10\,000$ *гс*)

$$e_0 = 0{,}022Q_1 = 0{,}022 \cdot 12{,}1 = 0{,}27 \text{ вольт/виток.}$$

4. Число витков первичной обмотки

$$w_1 = \frac{U_1}{e_0} = \frac{220}{0{,}27} = 815 \text{ витков.}$$

5. Число витков вторичной обмотки

$$w_2 = 1{,}4\frac{U_{ст}}{e_0} = 1{,}4\frac{220}{0{,}27} = 1\,140 \text{ витков.}$$

6. Число витков компенсационной обмотки

$$w_к = 0{,}3\,w_2 = 0{,}3 \cdot 1\,140 = 342 \text{ витка.}$$

7. Выбираем конденсатор C с рабочим напряжением $U_{раб} = 600$ *в*. Допустимое переменное напряжение на конденсаторе

$$U_c = 0{,}65U_{раб} = 0{,}65 \cdot 600 = 390 \ в.$$

8. Число витков дополнительной обмотки

$$w_3 = \frac{U_c}{e_0} - w_2 = \frac{390}{0{,}27} - 1\,140 = 305 \text{ витков.}$$

9. Емкость конденсатора

$$C = 13\,000\,\frac{P}{U_c^2} = 13\,000\,\frac{120}{390^2} = 10 \ мкф.$$

10. Ток первичной обмотки

$$I_1 = \frac{2P}{U_1} = \frac{2 \cdot 120}{220} = 1{,}1 \ a.$$

11. Ток дополнительной обмотки

$$I_3 = 1{,}5\frac{P}{U_{cm}} = 1{,}5\frac{120}{220} = 0{,}82 \ a.$$

12. Ток компенсационной обмотки

$$I_к = I_н = \frac{P}{U_{cm}} = \frac{120}{220} = 0{,}545 \ a.$$

13. Ток вторичной обмотки

$$I_2 = \sqrt{I_к^2 + I_3^2} = \sqrt{0{,}545^2 + 0{,}82^2} = 1 \ a.$$

14. Диаметры проводов обмоток (без изоляции):

первичной

$$d_1 = 0{,}8\sqrt{I_1} = 0{,}8\sqrt{1{,}1} = 0{,}84 \ мм;$$

компенсационной

$$d_к = 0{,}8\sqrt{I_к} = 0{,}8\sqrt{0{,}545} = 0{,}59 \ мм;$$

вторичной

$$d_2 = 0{,}9\sqrt{I_2} = 0{,}9\sqrt{1} = 0{,}9 \ мм;$$

дополнительной

$$d_3 = 0{,}9\sqrt{I_3} = 0{,}9\sqrt{0{,}82} = 0{,}82 \ мм.$$

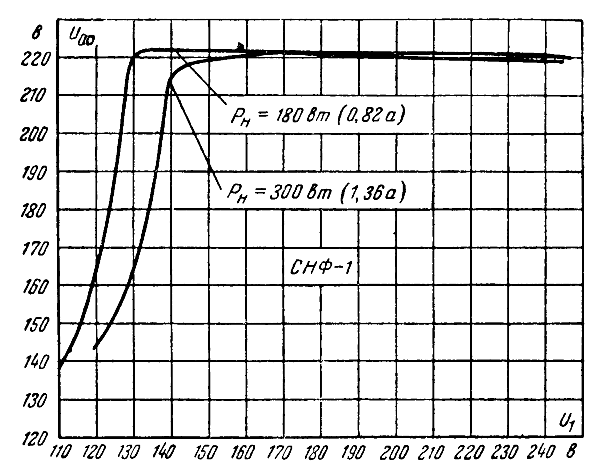
15. Для сборки стабилизатора по схеме фиг. 18 можно использовать Г-образные или прямые пластины, соответствующим образом обрезанные. При этом ширина пластины насыщенного стержня должна составлять 0,6 ширины пластины ненасыщенного стержня. Отношение высоты окна сердечника к его ширине рекомендуется выбрать в пределах 1,4 — 1,7, а отношение толщины пакета к ширине ненасыщенного стержня в пределах 1 — 2,5.

Сравнение схем феррорезонансных стабилизаторов и указания по их сборке. Рассмотренные схемы феррорезонансных стабилизаторов обладают рядом достоинств и недостатков, которые следует учитывать при выборе схемы.

Стабилизатор по схеме фиг. 16 отличается наиболее высокой степенью стабилизации и может обеспечить поддержание выходного напряжения с точностью ±1% при колебаниях напряжения сети на ±20—25% (фиг. 19). Пластины для изготовления дросселя и автотрансформатора применяются стандартные и не требуют дополнительной обра-

ботки. Однако размеры и расход материалов для этой схемы больше, чем для других схем.

Стабилизатор по схеме фиг. 17 обеспечивает поддержание выходного напряжения с точностью ±1% при колебаниях напряжения сети на ±10—15%, что несколько хуже по сравнению со схемой фиг. 16. Пластины для магнитопро-



Фиг. 19. Зависимость стабилизованного напряжения от напряжения сети для стабилизатора по схеме фиг. 16 (типа СНФ-1).

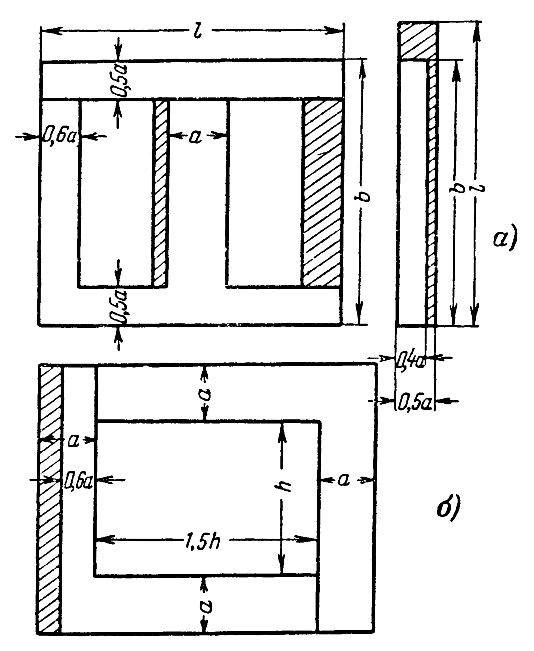
вода нужно переделывать из существующих стандартных пластин. Расход материала для этой схемы меньше, чем для предыдущей.

Стабилизатор по схеме фиг. 18 обладает худшими стабилизирующими свойствами по сравнению с другими феррорезонансными стабилизаторами. Однако он прост в изготовлении и имеет наименьшие размеры и вес. Для изготовления магнитопровода можно использовать Г-образные или прямые пластины трансформаторной стали с незначительной обрезкой. Регулировка таких стабилизаторов несколько усложняется из-за отсутствия регулирующего элемента (воздушного зазора).

Сердечники автотрансформатора по схеме фиг. 16 и стабилизаторов по схемам фиг. 17 и 18 собираются вперекрышку. Ненасыщенный дроссель (фиг. 16) и магнитный шунт (фиг. 17) собираются впритык с воздушным зазором между ярмом и стержнями сердечников. Ширина воздуш-

ного зазора регулируется толщиной картонной прокладки. Примерные способы обрезки пластин для сердечников по схемам фиг. 17 и 18 показаны на фиг. 20,*а* и *б* соответственно.

Так как формулы для расчета стабилизаторов являются приближенными, то для обеспечения возможности подгонки



Фиг. 20. Примеры обрезки пластин для сердечников.
Подлежащие обрезке части заштрихованы.

и регулировки необходимо во всех схемах стабилизаторов сделать отводы от вторичной w_2 и компенсационной $w_к$ обмоток. В этих обмотках нужно сделать 10—12 отводов через равное число витков в последних 25—30% витков. Вторичную обмотку w_2 желательно разделить на две части: внутреннюю без отводов и наружную с отводами, а дополнительную обмотку w_3 расположить между этими частями обмотки.

После расчета стабилизатора и выбора сердечника нужно обязательно проверить заполнение окна сердечника

обмотками. Для этого следует подсчитать площадь, занимаемую обмотками в окне с учетом изоляции провода, изоляционных прокладок и коэффициента заполнения. Если площадь, занимаемая обмотками, превысит площадь окна сердечника, то рекомендуется взять пластины большего размера. Если же площадь, занимаемая обмотками, окажется значительно меньше площади окна (в 1,5—2 раза), то нужно выбрать пластины меньших размеров.

Настройка стабилизаторов после сборки производится регулировкой воздушного зазора и переключением отводов вторичной и компенсационной обмоток. Настройка должна производиться при номинальной нагрузке стабилизатора.

Скачок выходного напряжения (фиг. 19) должен происходить при заданном минимальном напряжении сети. Если напряжение сети, при котором происходит скачок, выше заданного, то нужно постараться уменьшить зазоры в стыках между пластинами насыщенного сердечника или уменьшить нагрузку стабилизатора.

Если выходное напряжение после скачка продолжает заметно увеличиваться, то причиной этого может являться неправильное включение компенсационной обмотки, концы которой следует при этом поменять местами.

Величину выходного напряжения стабилизатора следует отрегулировать, изменяя число витков вторичной обмотки при помощи соответствующих отводов. Допускается небольшое увеличение емкости C для повышения выходного напряжения и уменьшение этой емкости для понижения напряжения.

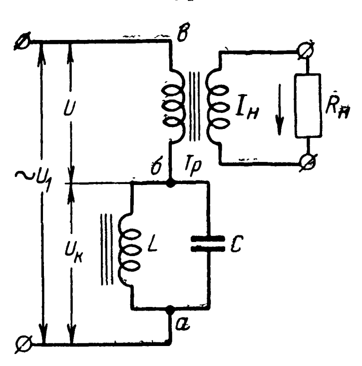
Если при изменении напряжения сети в заданных пределах выходное напряжение изменяется более чем на ± 1—2%, то необходимо отрегулировать воздушный зазор в дросселе с ненасыщенным сердечником или у магнитного шунта или переключить отводы компенсационной обмотки. В случае если выходное напряжение растет с ростом напряжения сети (недокомпенсация), то нужно увеличить число витков компенсационной обмотки или уменьшить воздушный зазор. В случае уменьшения выходного напряжения при увеличении напряжения сети (перекомпенсация) нужно уменьшить число включенных витков компенсационной обмотки или увеличить воздушный зазор ненасыщенного дросселя или магнитного шунта.

Уменьшая или увеличивая воздушный зазор ненасыщенного дросселя, мы соответственно увеличиваем или умень-

шаем его индуктивное сопротивление. Уменьшая или увеличивая воздушный зазор магнитного шунта, мы соответственно уменьшаем или увеличиваем изменение магнитного потока в насыщенном сердечнике, что приводит к уменьшению или к увеличению изменения выходного напряжения.

Резкое падение выходного напряжения ниже нормального указывает на пробой конденсаторов. Гудение пластин насыщенного сердечника устраняется более тугой стяжкой и деревянным клином, который вбивается между пластинами и каркасом катушки.

Стабилизаторы переменного тока. При соответствующем выборе емкости конденсатора C и индукции насыщенного дросселя L, образующих параллельный контур, можно построить схему стабилизатора переменного тока, поддерживающую неизменную величну тока в нагрузке при колебаниях напряжения сети и при изменениях сопротивления нагрузки. В этом случае используется участок вольтамперной характеристики контура, в пределах которого увеличение напряжения на контуре почти не изменяет ток в общей цепи. Иначе говоря, параллельный контур работает в таком режиме, что его сопротивление увеличивается с повышением напряжения на контуре и уменьшается с понижением напряжения. Получение требуемой вольтамперной характеристики контура достигается соответствующим выбором индукции насыщенного дросселя L и емкости конденсатора C.

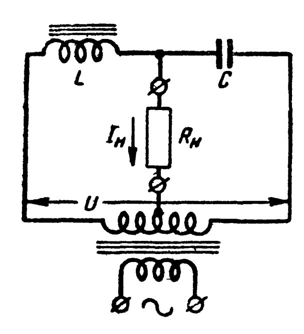


Фиг. 21. Схема стабилизатора переменного тока с параллельным контуром.

Схема стабилизатора тока с параллельным контуром LC показана на фиг. 21. Нагрузка $R_н$ включена через трансформатор $Тр$. Предположим, что напряжение сети U_1 возросло. При этом сопротивление контура (между точками a и $б$) увеличится и на нем упадет почти весь избыток напряжения сети, а напряжение U между точками $б$ и $в$ (т. е. на нагрузке) и, следовательно, ток нагрузки $I_н$ останутся почти без изменения. В случае понижения напряжения сети сопротивление контура и падение на нем

уменьшаются, а напряжение U остается почти неизменным. Таким образом, при неизменной нагрузке $R_н$ схема работает, как стабилизатор напряжения[1].

Если сопротивление нагрузки $R_н$ возрастает, то соответственно увеличивается сопротивление между точками *б* и *в*. При этом напряжение на контуре $U_к$ уменьшается, а напряжение на нагрузке U увеличивается. Уменьшение напряжения на контуре $U_к$ вызывает уменьшение сопротивления контура, что приводит к дальнейшему уменьшению напряжения $U_к$ и увеличению напряжения на нагрузке U. Напряжение на нагрузке U увеличивается настолько, что ток нагрузки $I_н$ остается почти без изменения, несмотря на увеличившееся сопротивление $R_н$. Уменьшение сопротивления нагрузки приводит к резкому увеличению напряжения на контуре и к уменьшению напряжения на нагрузке, в результате чего ток $I_н$ почти не меняется. В данном случае постоянство тока поддерживается за счет соответствующего изменения напряжения на нагрузке U.



Фиг. 22. Схема стабилизатора переменного тока без нелинейных элементов.

Существуют схемы стабилизаторов переменного тока без нелинейных элементов, в частности, без насыщенных стальных сердечников. Одна из таких схем (схема Бушеро) изображена на фиг. 22. Если сопротивление дросселя L равно нулю (идеальный случай), то при условии настройки контура в резонанс с частотой питающей сети f

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

ток в нагрузке будет равен

$$I_н = \frac{U}{\sqrt{\frac{L}{C}}}.$$

[1] Описание этой схемы, работающей в режиме стабилизации напряжения, дано в статье А. Митрофанова, Феррорезонансные стабилизаторы, „Радио" 1952, № 7.

Из приведенного выражения следует, что ток нагрузки $I_н$ не зависит от сопротивления нагрузки $R_н$. Нужно подчеркнуть, что в этой схеме ток $I_н$ будет оставаться неизменным только при постоянстве питающего напряжения U. В реальной схеме, где дроссель L обладает активным сопротивлением, ток $I_н$ будет немного изменяться в зависимости от сопротивления нагрузки $R_н$.

Схемы стабилизаторов переменного тока могут найти применение, например, в случае последовательного включения осветительных ламп. При изменении числа последовательно включенных ламп ток через них будет поддерживаться неизменным.

СТАБИЛИЗАТОРЫ С МАГНИТНЫМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

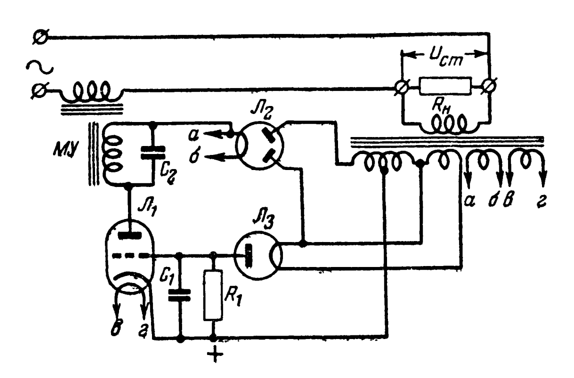
Рассмотренные выше электромагнитные стабилизаторы, в том числе феррорезонансные, как уже было указано, обладают существенным недостатком — зависимостью стабилизованного напряжения от частоты сети. Кроме того, изменение величины и характера нагрузки влияет на величину выходного напряжения стабилизатора. Изменение параметров схемы феррорезонансного стабилизатора (например, изменение емкости конденсатора и изменение напряжения обмоток вследствие прогрева), также влияет на величину стабилизованного напряжения.

Применение магнитных усилителей позволяет ввести в схему стабилизатора цепь отрицательной обратной связи между напряжением на нагрузке и током через управляющую (подмагничивающую) обмотку. Наличие обратной связи в схеме стабилизатора в значительной степени устраняет зависимость стабилизованного напряжения от частоты сети, от величины и характера нагрузки и от изменения параметров схемы. В этом заключается основное преимущество схем с магнитными усилителями по сравнению с феррорезонансными стабилизаторами. Недостатком схем с магнитными усилителями, как и других схем с обратной связью, является опасность возникновения самовозбуждения, для борьбы с которым иногда приходится усложнять схему введением развязывающих цепей, состоящих из комбинации R, C и L.

Магнитный усилитель позволяет также стабилизировать постоянное выпрямленное напряжение. При этом выпрям-

ленное напряжение через цепь обратной связи воздействует на подмагничивающий ток магнитного усилителя, управляющего напряжением на первичной обмотке трансформатора выпрямителя.

Стабилизаторы переменного напряжения с магнитными усилителями. Рассмотрим простейшую схему стабилизатора с магнитным усилителем, изображенную на фиг. 23. Управляющая обмотка магнитного усилителя *МУ* включена в анодную цепь управляющей лампы $Л_1$, которая питается



Фиг. 23. Схема стабилизатора переменного напряжения с магнитным усилителем.

от специального выпрямителя с кенотроном $Л_2$. В качестве чувствительного элемента, реагирующего на изменение выходного переменного напряжения U_{cm}, в схеме применен диод $Л_3$ с вольфрамовым катодом (например, типа 4Ц6С), работающий в режиме насыщения. Как известно, анодный ток электронной лампы, работающей в режиме насыщения, резко изменяется в зависимости от напряжения накала этой лампы[1]. Диод $Л_3$ работает в качестве однополупериодного выпрямителя, напряжение на который подается от половины анодной обмотки выпрямителя, служащего для питания лампы $Л_1$. Нагрузкой однополупериодного выпрямителя служит сопротивление R_1, шунтированное конденсатором C_1, сглаживающим пульсацию выпрямителя. Конденсатор C_2, шунтирующий управляющую обмотку магнитного усилителя,

---

[1] Оптимальный режим насыщения для лампы 4Ц6С: $U_a = 50$—250 *в*, $U_{нак} = 3{,}2$ *в*.

уменьшает перенапряжения на обмотке, возникающие при резких изменениях тока подмагничивания.

При повышении напряжения на нагрузке, вызванном увеличением напряжения питающей сети или уменьшением тока нагрузки, увеличится напряжение накала диода $Л_3$. Выпрямленный ток диода возрастет и вызовет увеличение падения напряжения на сопротивлении нагрузки R_1. При этом возрастет отрицательное напряжение на сетке управляющей лампы $Л_1$, ток управляющей обмотки *МУ* уменьшится, а индуктивное сопротивление основной обмотки увеличится. В результате падение напряжения на основной обмотке *МУ* возрастет, а напряжение на нагрузке снизится почти до нормального.

Аналогично работает схема и при уменьшении напряжения на нагрузке. Схема такого типа может обеспечить поддержание выходного напряжения в пределах $\pm 0,5\%$ при изменениях напряжения сети на $\pm 15\%$.

Таким образом, в схеме фиг. 23 изменение выходного напряжения стабилизатора воздействует через цепь отрицательной обратной связи на магнитный усилитель, который в свою очередь управляет напряжением на выходе стабилизатора.

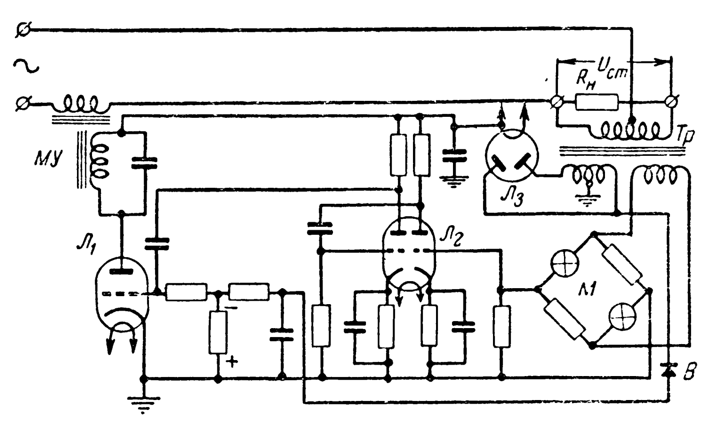
Точность поддержания выходного напряжения в схемах стабилизаторов с отрицательной обратной связью определяется, в частности, коэффициентом усиления усилителя, входящего в цепь обратной связи. Чем больше коэффициент усиления, тем меньше изменения выходного напряжения. В схеме фиг. 23 усиление определяется чувствительностью диода $Л_3$ к изменениям напряжения накала, крутизной характеристики управляющей лампы $Л_1$ и коэффициентом усиления магнитного усилителя (отношением изменения выходного напряжения к изменению тока в управляющей обмотке).

Однако следует помнить, что увеличение коэффициента усиления в цепи отрицательной обратной связи может непроизвольно привести к возникновению положительной обратной связи, вызывающей самовозбуждение системы.

На фиг. 24 приведена схема стабилизатора переменного напряжения с усилителем в цепи обратной связи, позволяющим получить более высокую стабильность выходного напряжения по сравнению со схемой фиг. 23.

Чувствительным элементом схемы фиг. 24, реагирующим на изменения выходного напряжения, является нелинейный

мост M, подобный мосту на фиг. 11. Однако режим использования моста в схеме фиг. 24 принципиально отличается от режима использования его в схеме фиг. 11. В последней используется плоская часть вольтамперной характеристики моста (фиг. 12), а в схеме фиг. 24 — падающая часть этой характеристики, лежащая справа от плоской части и образующаяся при дальнейшем увеличении входного напряжения. На фиг. 12 видно начало падающего участка характе-



Фиг. 24. Схема стабилизатора переменного напряжения с повышенной стабильностью.

ристики при напряжении на первичной обмотке трансформатора $U_1 \approx 200$ *в*. Таким образом, напряжение на выходе моста в схеме фиг. 24 падает при увеличении входного напряжения и увеличивается при уменьшении входного напряжения.

С выхода моста напряжение поступает на вход двухкаскадного усилителя переменного напряжения с лампой $Л_2$. Выход этого усилителя соединен с цепью сетки управляющей лампы $Л_1$. При отсутствии переменного напряжения на сетке лампа $Л_1$ заперта, так как на ее сетку подается постоянное отрицательное смещение от однополупериодного выпрямителя B. При подаче переменного напряжения на сетку лампа $Л_1$ отпирается, причем величина ее анодного тока будет пропорциональна амплитуде переменного напряжения на сетке

В анодную цепь управляющей лампы включена управляющая обмотка магнитного усилителя $МУ$. Для того что-

бы напряжение на нагрузке $R_н$ равнялось напряжению питающей сети, первичная обмотка трансформатора *Тр* выполнена в виде автотрансформатора, который компенсирует потерю напряжения на основной обмотке магнитного усилителя *МУ*. Питание усилительной $Л_2$ и управляющей $Л_1$ ламп производится от двухполупериодного выпрямителя с кенотроном $Л_3$.

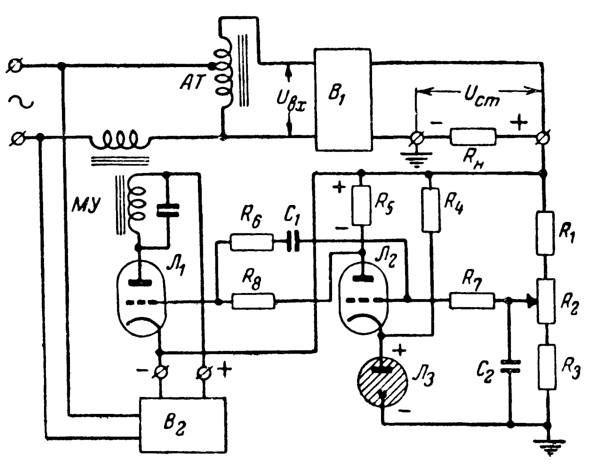
Рассмотрим принцип действия стабилизатора. Предположим, что напряжение на нагрузке $R_н$ уменьшилось. Тогда напряжение на выходе моста *М*, питаемого от трансформатора *Тр*, и, следовательно, на выходе усилителя $Л_2$ увеличится. Так как амплитуда напряжения на сетке управляющей лампы $Л_1$ при этом возрастает, то увеличивается ее анодный ток, протекающий по управляющей обмотке магнитного усилителя. Индуктивное сопротивление основной обмотки *МУ* понижается, падение напряжения на ней уменьшается, а напряжение на нагрузке повышается до нормального. При повышении напряжения на нагрузке индуктивное сопротивление основной обмотки *МУ* увеличивается, что также приводит к восстановлению нормального напряжения на нагрузке.

Стабилизатор выпрямленного напряжения с магнитным усилителем. Стабилизаторы переменного напряжения, описанные выше, обеспечивают постоянство эффективного напряжения на нагрузке. Однако форма кривой переменного стабилизованного напряжения в процессе автоматического регулирования не остается неизменной, а более или менее искажается по сравнению с синусоидальной формой. Если анодный трансформатор выпрямителя питать от стабилизатора переменного напряжения, то, несмотря на постоянство эффективного значения переменного напряжения, выпрямленное напряжение будет немного изменяться при искажениях формы кривой питающего напряжения. Так как во многих случаях нужно с большой точностью поддерживать величину выпрямленного напряжения, то цепь обратной связи в стабилизаторе должна при этом охватывать также и выпрямленное напряжение. Одна из таких схем приведена на фиг. 25.

Переменное напряжение подается через основную обмотку магнитного усилителя *МУ* на автотрансформатор *АТ*, от которого питается стабилизируемый выпрямитель $В_1$. Часть выпрямленного напряжения с делителя $R_1R_2R_3$ подается

на сетку усилительной лампы $Л_2$, в катод которой включен газовый стабилизатор напряжения $Л_3$ *. Напряжение горения газового стабилизатора (который питается от выпрямителя B_1 через сопротивление R_4) практически постоянно. На участок сетка — катод лампы $Л_2$ подается разность напряжений делителя и газового стабилизатора.

В анодную цепь лампы усилителя постоянного тока $Л_2$ включено сопротивление R_5, напряжение с которого подает-



Фиг. 25. Схема стабилизатора выпрямленного напряжения с магнитным усилителем.

ся на сетку — катод управляющей лампы $Л_1$. Управляющая обмотка магнитного усилителя *МУ* включена в анодную цепь лампы $Л_1$, питание которой производится от вспомогательного выпрямителя B_2. Необходимость иметь отдельный выпрямитель объясняется тем, что катод управляющей лампы не может быть заземлен, а, как видно из схемы, должен находиться под положительным, по отношению к земле, потенциалом.

Цепь отрицательной обратной связи C_1R_6 включается в тех случаях, когда в схеме возникает самовозбуждение, вызванное непроизвольным появлением положительной обратной связи. Сопротивления в цепях сеток ламп R_7 и R_8 также служат для гашения могущих возникнуть в схеме

* Устройство и принцип действия газовых стабилизаторов изложены ниже.

паразитных колебаний. Конденсатор C_2 улучшает фильтрацию напряжения, поступающего с выхода стабилизатора на сетку усилительной лампы $Л_2$.

Стабилизатор работает следующим образом. Увеличение выпрямленного напряжения на нагрузке $R_н$ приводит к уменьшению отрицательного смещения на сетке лампы $Л_2$ и к увеличению ее анодного тока. Падение напряжения на сопротивлении R_5 возрастает, в результате чего увеличивается отрицательное смещение на сетке управляющей лампы $Л_1$. При этом ток в управляющей обмотке падает, индуктивное сопротивление основной обмотки *МУ* увеличивается и снижается переменное напряжение $U_{вх}$ на входе выпрямителя $В_1$. Входное напряжение $U_{вх}$ уменьшится при этом настолько, что выпрямленное напряжение на нагрузке $U_{ст}$ понизится почти до заданной величины.

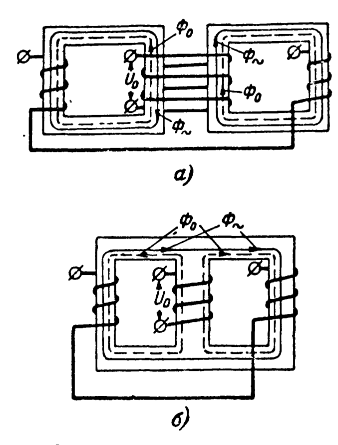
Так как изменение входного переменного напряжения выпрямителя $U_{вх}$ должно компенсировать как изменение напряжения питающей сети, так и изменение тока нагрузки выпрямителя, то колебания входного напряжения $U_{вх}$ могут быть весьма значительными (больше колебаний напряжения питающей сети). В таком случае, если выпрямитель $В_1$ содержит кенотроны, то во избежание работы с большим недокалом или перекалом рекомендуется питать их от нестабилизованного переменного напряжения.

В качестве усилительных ламп в схемах фиг. 24 и 25 применяются триоды с бо́льшим коэффициентом усиления или пентоды. В качестве управляющих ламп в схемах фиг. 23, 24 и 25 применяются лампы с большой крутизной и большим анодным током, как, например, лучевые тетроды 6П1П, 6П6С, 6П3С или пентоды 6П9, 6Ж4 в триодном соединении.

Все стабилизаторы с магнитными усилителями инерционны и поэтому не могут поддерживать постоянство выходного напряжения при быстрых изменениях напряжения сети и нагрузки. Время запаздывания у этих стабилизаторов может достигать нескольких десятых долей секунды. Чем меньше индуктивность управляющей обмотки *МУ*, тем меньше запаздывание. Поэтому с этой точки зрения желательно работать при больших токах подмагничивания, что позволяет уменьшить число витков управляющей обмотки, а следовательно, уменьшить ее индуктивность.

Конструкция и расчет магнитного усилителя. Основным элементом в схемах стабилизаторов фиг. 23, 24 и 25 является магнитный усилитель *МУ*. Рассмотрим его устройство. На фиг. 26 показаны две наиболее употребительные конструкции магнитных усилителей.

Магнитный усилитель на фиг. 26,*а* состоит из двух отдельных двухстержневых сердечников. Обмотки переменного тока намотаны на крайних стержнях сердечников, а управляющая обмотка охватывает два средних стержня. Магнитный усилитель на фиг. 26,*б* представляет собой один трехстержневой сердечник (Ш-образный). Обмотки переменного тока расположены на крайних стержнях, а управляющая — на среднем стержне. Обмотки переменного тока могут соединяться либо последовательно, либо параллельно.



Фиг. 26. Конструкции магнитных усилителей (дросселей насыщения).

Обычно обмотка управления имеет в 5—15 раз больше витков, чем основная обмотка *МУ*. Поэтому появление переменного напряжения в управляющей обмотке может вызвать пробой ее изоляции, а также нарушить нормальную работу регулирующей лампы. Расположение обмоток у *МУ* фиг. 26 обеспечивает отсутствие переменной составляющей напряжения в управляющей обмотке. В магнитном усилителе фиг. 26,*а* переменный магнитный поток $\Phi_\sim$ проходит по двум средним стержням в противоположных направлениях, вследствие чего в управляющей обмотке переменная э. д. с. индуктироваться не будет. Постоянный магнитный поток Φ_0 в одном стержне совпадает по направлению с переменным потоком $\Phi_\sim$, а в другом—направлен ему навстречу. В конструкции фиг. 26,*б* переменный магнитный поток $\Phi_\sim$ не заходит в средний стержень, а замыкается через крайние стержни, что также устраняет возможность появления переменной э. д. с. в управляющей обмотке.

Магнитный усилитель, изготовленный по схеме фиг. 26, *б*, является более компактным по сравнению с *МУ* фиг. 26, *а* и требует меньше меди для своего изготовления.

Пример 4. Рассмотрим порядок приближенного расчета магнитного усилителя по схеме фиг. 26,*б*. Расчет ведется для частоты сети $f = 50$ *гц*, для изменения напряжения сети в пределах $\pm$ 10% и для сердечника из стали марки Э4АА.

Рассчитать магнитный усилитель для работы в схеме стабилизатора переменного напряжения при напряжении сети $U_1 = 220$ *в* $\pm$ 10% и мощности в нагрузке $P_н = 80$ *ва*. Напряжение через *МУ* подается на первичную обмотку автотрансформатора, который повышает напряжение на нагрузке до 220 *в* (фиг. 24).

1. Напряжение на первичной обмотке автотрансформатора (после *МУ*)

$$U_{ст_1} = 0{,}76 U_1 = 0{,}76 \cdot 220 = 167 \text{ в}.$$

2. Максимальное напряжение на основной обмотке *МУ*

$$U_{OO\,макс} = 0{,}52 U_1 = 0{,}52 \cdot 220 = 114 \text{ в}.$$

3. Минимальное напряжение на *МУ*

$$U_{OO\,мин} = 0{,}26 U_1 = 0{,}26 \cdot 220 = 57 \text{ в}.$$

4. Ток основной обмотки *МУ* (обмотка переменного тока)

$$I_\sim = \frac{P_н}{U_{ст_1}} = \frac{80}{167} = 0{,}48 \text{ а}.$$

5. Необходимый объем стали сердечника, по которому проходит переменный магнитный поток:

$$V_\sim = 1{,}8 U_{OO\,макс} I_\sim = 1{,}8 \cdot 114 \cdot 0{,}48 = 100 \text{ см}^3.$$

6. По табл. 1 выбираем сердечник из пластин Ш-20 с окном высотой 5 *см*.

Тогда толщина пакета будет составлять

$$c = \frac{V_\sim}{0{,}9 \frac{a}{2} l_\sim} = \frac{100}{22{,}6} = 4{,}4 \text{ см}.$$

(Выражение $V_\sim = 0{,}9 \frac{a}{2} l_\sim c = 22{,}6c$ приведено в табл. 1). Отношение $\frac{c}{a} = \frac{4{,}4}{2} = 2{,}2$ лежит в нормальных пределах (от 1 до 2,5); следовательно, размер пластин выбран правильно.

7. Из табл. 1 находим:

среднюю длину силовой линии для переменного магнитного потока

$$l_\sim = 25{,}1 \text{ см};$$

среднюю длину силовой линии для постоянного магнитного потока

$$l_0 = 17{,}1 \text{ см}.$$

8. Число витков обмотки переменного тока

$$w_{\sim} = 20\frac{l_{\sim}}{I_{\sim}} = 20\frac{25{,}1}{0{,}48} = 1\,050 \text{ витков}.$$

При последовательном соединении обмоток переменного тока каждая катушка должна иметь по 525 витков; провод обмотки следует рассчитывать на ток

$$I_{\sim} = 0{,}48 \ a.$$

При параллельном соединении обмоток каждая катушка должна иметь по 1 050 витков; провод катушек рассчитывается на ток

$$\frac{I_{\sim}}{2} = 0{,}24 \ a.$$

9. Выбираем максимальный ток управляющей обмотки $I_{0\,макс} = 30$ *ма*. Этот ток может обеспечить управляющая лампа типа 6П1П или 6П6С в триодном соединении.

10. Число витков управляющей обмотки

$$w_0 = 14\frac{l_0}{I_{0\,макс}} = 14\frac{17{,}1}{0{,}03} \approx 8\,000 \text{ витков}.$$

11. Диаметры проводов обмоток выбираются, исходя из плотности тока 2 — 3 *а/мм²*.

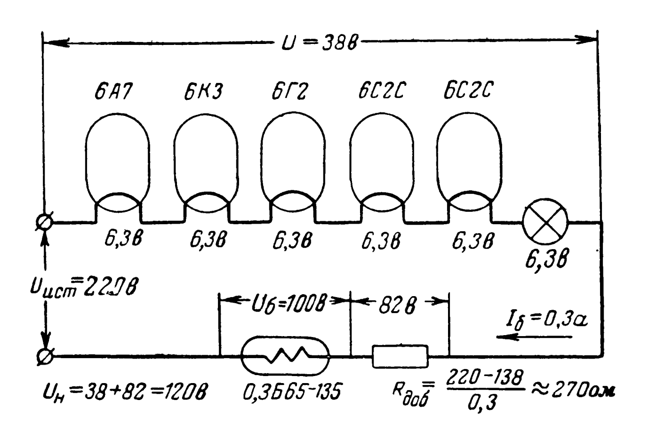
Необходимо проверить заполнение окна сердечника. Если обмотки не умещаются, нужно перейти на следующий штамп.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ БАРЕТТЕРА

Бареттер представляет собой стальную или вольфрамовую нить, помещенную в стеклянный баллон, наполненный водородом. Действие бареттера основано на том, что сопротивление металлической нити резко увеличивается при сравнительно небольшом увеличении тока через нее. Если бареттер включить последовательно в цепь, где нужно поддерживать постоянство тока, например в цепь накала ламп бестрансформаторного приемника (фиг. 27), то при увеличении питающего напряжения падение напряжения на бареттере будет резко возрастать, а при уменьшении резко падать, в результате чего падение напряжения на нагрузке и ток в цепи останутся почти без изменений.

Очевидно, что схему с бареттером, поддерживающим неизменный ток в постоянном сопротивлении нагрузки, можно рассматривать как схему стабилизатора напряжения, так как напряжение на нагрузке в этом случае поддерживается неизменным.

Бареттеры могут работать не только на постоянном, но и на переменном токе, так как из-за тепловой инерции нити



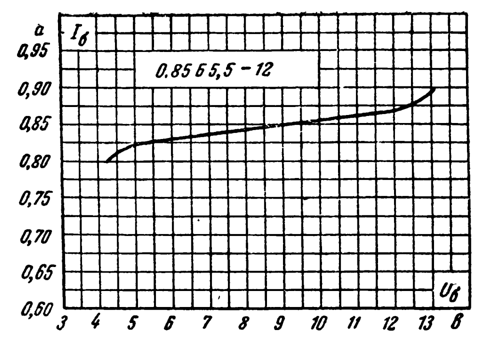
Фиг. 27. Включение бареттера в цепь накала ламп и распределение напряжений в цепи.

ее сопротивление не успевает изменяться с частотой питающего тока. По этой же причине барретер стабилизирует только при медленных изменениях питающего напряжения. Быстрые изменения входного напряжения проходят в цепь нагрузки беспрепятственно.

Всякий бареттер характеризуется номинальным током, который он может поддерживать и пределами напряжения бареттирования, в которых этот ток остается неизменным. Вследствие тепловой инерции нити номинальный ток бареттера устанавливается только через некоторое время после включения (через 1—3 мин.).

На фиг. 28 приведена характеристика бареттера типа 0,85Б5,5-12, из которой видно, что пределы бареттирования составляют 5,5—12 *в*, а средний (номинальный) ток бареттирования равен 0,85 *а*.

Основные характеристики употребительных бареттеров даны в табл. 2.



Фиг. 28. Вольтамперная характеристика бареттера типа 0,85Б5,5-12.

Таблица 2

Основные данные бареттеров

Параметры	Типы						
	0,24Б12-18	0,3Б17-35	0,3Б65-135	0,425Б5,5-12	0,85Б5,5-12	1Б5-9	1Б10-17
Напряжение нижнего предела бареттирования $U_{б.мин}$, *в* .	12	17	65	5,5	5,5	5	10
Напряжение верхнего предела бареттирования $U_{б.макс}$, *в* . .	18	35	135	12	12	9	17
Ток нижнего предела бареттирования $I_{б.мин}$, *ма*	247	275	275	415	830	960	960
Ток верхнего предела бареттирования $I_{б.макс}$, *ма*	263	325	325	435	870	1 040	1 040
Номинальный ток бареттирования $I_б$, *ма*	255	300	300	425	850	1 000	1 000
Динамическое сопротивление $R_д$, *ом* $R_д = \frac{U_{б.макс} - U_{б.мин}}{I_{б.макс} - I_{б.мин}}$	375	360	1 400	325	160	50	90

Первое число в обозначении бареттера указывает его номинальный ток в амперах, а вторые два числа — пределы бареттирования в вольтах.

Бареттер может поддерживать только номинальный ток, указанный в его паспорте. Поэтому все элементы цепи, в которую включен бареттер, должны быть рассчитаны на его номинальный ток (фиг. 27). Если элемент, включенный последовательно с бареттером, рассчитан на ток, меньший номинального, то его нужно шунтировать сопротивлением, через которое будет течь дополнительный (до номинального) ток.

Падение напряжения на бареттере $U_б$ при номинальном напряжении питающей сети определяет рабочую точку бареттирования. Для того чтобы правильно выбрать рабочую точку на характеристике бареттера, нужно знать величину колебаний напряжения питающей сети (источника).

Если обозначить через α понижение напряжения сети в процентах от номинала, через β — повышение напряжения сети в процентах от номинала, через $U_{б.\,мин}$ — напряжение нижнего предела бареттирования в вольтах и через $U_{б.\,макс}$ — напряжение верхнего предела бареттирования в вольтах, то падение напряжения на бареттере $U_б$ в вольтах, соответствующее рабочей точке бареттирования, будет

$$U_б = \frac{U_{б.\,макс}\alpha + U_{б.\,мин}\beta}{\alpha + \beta}. \qquad (1)$$

Нетрудно сообразить, что если напряжение сети колеблется вверх и вниз на одну и ту же величину ($\alpha = \beta$), то рабочая точка будет находиться посредине между верхним и нижним пределами бареттирования.

Необходимое напряжение источника питания $U_{ист}$ определяется как сумма напряжений на нагрузке $U_н$ и на бареттере $U_б$:

$$U_{ист} = U_н + U_б. \qquad (2)$$

При этом желательно подобрать бареттер так, чтобы напряжение $U_б$ на нем мало отличалось от напряжения $U_н$ на нагрузке. Если напряжение источника больше этой суммы напряжений, то последовательно в цепь нужно включить соответствующее добавочное сопротив-

ление $R_{доб}$ (фиг. 27), которое войдет в сопротивление нагрузки.

Качество стабилизации определяется величиной коэффициента стабилизации $K_б$, который показывает, во сколько раз процентное изменение тока нагрузки меньше процентного изменения напряжения источника питания, и выражается формулой

$$K_б = \frac{R_д I_б}{U_{ист}}, \quad (3)$$

где $R_д$ — динамическое сопротивление бареттера (значения указаны в табл. 2), *ом*;

$I_б$ — номинальный ток бареттера, *а*;

$U_{ист}$ — напряжение источника, *в*.

В практике может встретиться случай, когда нужно поддерживать постоянство тока в нагрузке при неизменном напряжении питающей сети и при меняющемся сопротивлении нагрузки (например, при изменении числа последовательно включенных ламп). В этом случае напряжение на бареттере увеличится или уменьшится как раз настолько, насколько уменьшится или увеличится напряжение на нагрузке.

В заключение расчета схемы с бареттером необходимо проверить, не выходят ли крайние значения напряжений на бареттере за пределы бареттирования.

При максимальном напряжении источника питания наибольшее напряжение на бареттере должно быть меньше или равно $U_{б.макс}$:

$$U_{ист}\left(1 + \frac{\beta}{100}\right) - U_н \leqslant U_{б.макс}. \quad (4)$$

При минимальном напряжении источника питания наименьшее напряжение на бареттере должно быть больше или равно $U_{б.мин}$

$$U_{ист}\left(1 - \frac{\alpha}{100}\right) - U_н \geqslant U_{б.мин}. \quad (5)$$

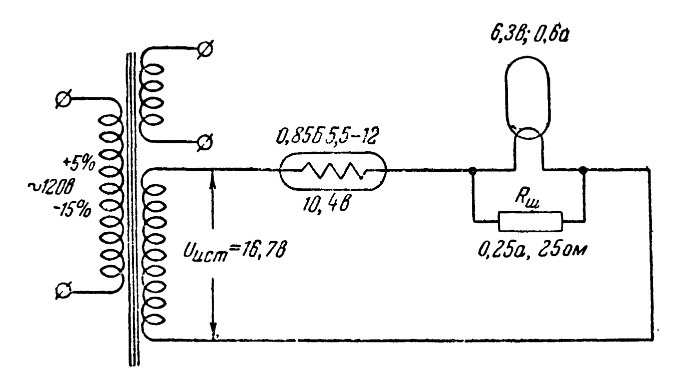
Пример 5. Необходимо стабилизовать ток накала лампы, работающей в качестве гетеродина. Напряжение накала $U_н = 6{,}3$ *в*. Ток накала $I_н = 0{,}6$ *а*. Питание производится от сети 120 *в* с колебаниями $+5\%$ и -15% ($\alpha = 15$, $\beta = 5$).

1. Наиболее подходящим для этой цели является бареттер 0,85Б5,5-12, так как его среднее напряжение бареттирования (около 9 *в*) близко к напряжению на нагрузке (6,3 *в*). Так как ток нагрузки (0,6 *а*) меньше номинального тока бареттирования (0,85 *а*), то параллельно нагрузке следует включить шунтирующее сопротивление $R_ш$ (фиг. 29);

$$R_ш = \frac{U_н}{I_б - I_н} = \frac{6{,}3}{0{,}85 - 0{,}6} = 25 \text{ ом}.$$

2. Мощность, рассеиваемая на этом сопротивлении:

$$\frac{U_н^2}{R_ш} = \frac{6{,}3^2}{25} = 1{,}6 \text{ вт}.$$



Фиг. 29. Схема включения бареттера (к примеру 5).

3. Рабочая точка бареттирования определяется по формуле (1):

$$U_б = \frac{U_{б.макс}\alpha + U_{б.мин}\beta}{\alpha + \beta} = \frac{12 \cdot 15 + 5{,}5 \cdot 5}{15 + 5} = 10{,}4 \text{ в}.$$

4. Необходимое напряжение источника определяется по формуле (2):

$$U_{ист} = U_н + U_б = 6{,}3 + 10{,}4 = 16{,}7 \text{ в}.$$

Это напряжение нужно получить от специальной обмотки трансформатора.

5. Коэффициент стабилизации по формуле (3) равен:

$$K_б = \frac{R_д I_б}{U_{ист}} = \frac{160 \cdot 0{,}85}{16{,}7} = 8{,}15.$$

6. Проверим наибольшее и наименьшее напряжения на бареттере при колебаниях напряжении сети по формулам (4) и (5):

$$U_{ист}\left(1+\frac{\beta}{100}\right)-U_н=16{,}7\left(1+\frac{5}{100}\right)-6{,}3=11{,}2\ в<U_{б.\,макс};$$

$$U_{ист}\left(1-\frac{\alpha}{100}\right)-U_н=16{,}7\left(1-\frac{15}{100}\right)-6{,}3=7{,}9\ в>U_{б.\,мин}.$$

Таким образом, напряжения на бареттере не выходят за пределы бареттирования (5,5 — 12 *в*).

СХЕМЫ С ГАЗОВЫМИ СТАБИЛИЗАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЯ

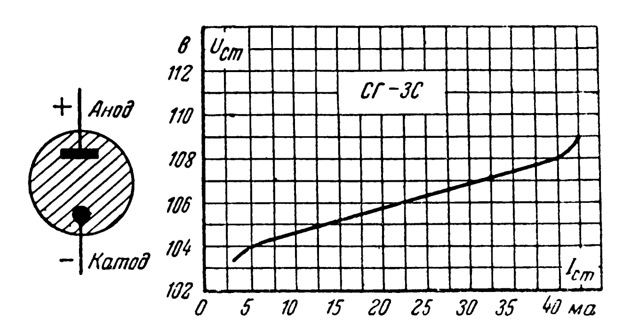
Газовый стабилизатор напряжения состоит из двух электродов (анода и холодного катода), помещенных в стеклянный баллон, наполненный инертным газом (аргоном, неоном). Катод представляет собой металлический цилиндр диаметром 15—20 *мм*, а анод имеет вид тонкого стержня, расположенного вдоль оси цилиндрического катода.

В газовых стабилизаторах используется явление тлеющего разряда между холодными электродами, при котором внутренняя поверхность цилиндрического катода начинает светиться под воздействием напряжения, приложенного между анодом и катодом. Характерное свойство ламп тлеющего разряда заключается в том, что при изменении тока через лампу напряжение горения на ее электродах изменяется весьма незначительно.

В качестве примера на фиг. 30 показана вольтамперная характеристика газового стабилизатора СГ-3С. Там же показано условное графическое обозначение газового стабилизатора. Из характеристики видно, что значительные изменения тока через лампу (от 5 до 40 *ма*) вызывают лишь небольшие изменения напряжения на ее электродах (около 4 *в*).

Газовые стабилизаторы напряжения характеризуются величиной напряжения горения и пределами изменения тока через лампу, при которых напряжение горения остается почти постоянным. Для того чтобы создать условия для возникновения тлеющего разряда, к лампе нужно приложить напряжение несколько выше напряжения горения. Это напряжение называется напряжением зажигания газового стабилизатора.

Газовые стабилизаторы нормально работают только от источников постоянного тока. При их включении следует строго соблюдать полярность: на анод надо подавать «плюс», а на катод «минус» напряжения источника. Нельзя включать газовый стабилизатор без последовательного сопротивления, ограничивающего ток через лампу.



Фиг. 30. Вольтамперная характеристика газового стабилизатора СГ-3С и условное обозначение газовых стабилизаторов.

Данные газовых стабилизаторов напряжения, выпускаемых промышленностью, приведены в табл. 3.

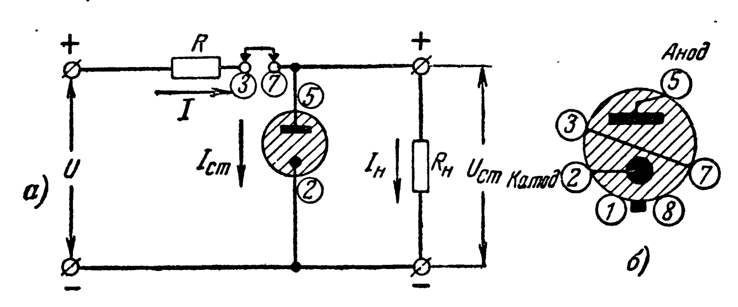
Таблица 3

Основные данные газовых стабилизаторов

Параметры	Типы		
	СГ-2С	СГ-3С	СГ-4С и СГ-1П
Напряжение горения U_{cm}, *в*	70—81	105—112	145—160
Напряжение зажигания $U_з$, *в* . . .	105	127	180
Пределы изменения тока через лампу I_{cm}, *ма*	5—30 (40)	5—30 (40)	5—30 (40)
Динамическое сопротивление $R_д$, *ом* $R_д = \frac{U_{ст.\,макс} - U'_{ст.\,мин}}{I_{ст.\,макс} - I_{ст.\,мин}}$	240—260	80—120	160—220

Примечание. В скобках указаны максимально допустимые токи через лампы

Простейшая схема с газовым стабилизатором напряжения показана на фиг. 31,*а*. Очевидно, что с помощью этой схемы можно получить стабилизованные напряжения не выше 150 *в* (применив лампу-СГ-4С). Если необходимо получить более высокое стабилизованное напряжение, то можно включить последовательно два или больше газовых стабилизаторов (фиг. 32,*а*). Например, напряжение 225 *в* можно получить, включив последовательно лампы СГ-4С и СГ-2С; напряжение 180 *в* можно получить, включив лампы СГ-3С и СГ-2С, и т. д.



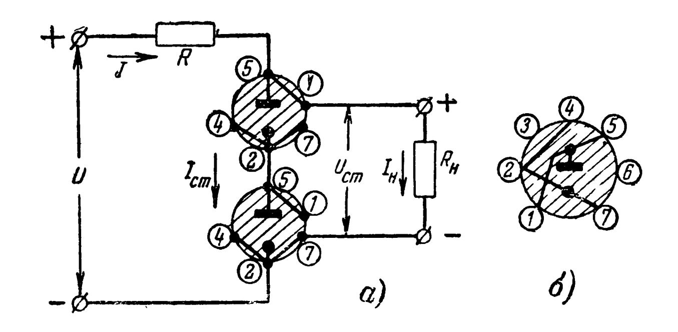
Фиг. 31. Схема стабилизатора напряжения с лампой тлеющего разряда.

На фиг. 31,*б* показана схема цоколевки газовых стабилизаторов типа СГ-2С, СГ-3С и СГ-4С. На штырьки *3* и *7* выведена перемычка, которую обычно включают последовательно в цепь источника питания схемы стабилизатора. Включение, показанное на фиг. 31,*а* (точки *3* и *7* показаны вне лампы), предохраняет цепь нагрузки от повышенного напряжения в случае, если лампа будет вынута. Перемычку на штырьках *3* и *7* часто включают в цепь первичной обмотки трансформатора выпрямителя, питающего схему стабилизатора.

В лампе типа СГ-1П (фиг. 32,*б*) эта перемычка отсутствует, но анод выведен одновременно на штырьки *1* и *5*, а катод — на штырьки *2*, *4* и *7*. Это также дает возможность защитить нагрузку от повышенного напряжения при вынутой лампе (см. схему включения на фиг. 32,*а*).

Стабилизаторы напряжения, схемы которых показаны на фиг. 31 и 32, поддерживают выходное напряжение $U_{ст}$ почти неизменным при изменении входного напряжения, а также при изменении тока нагрузки $I_н$.

Рассмотрим принцип действия этих стабилизаторов напряжения. Предположим, что входное напряжение U увеличилось. При этом резко увеличится ток $I_{ст}$ через газовый стабилизатор и возрастет падение напряжения на ограничивающем сопротивлении R, а напряжение на выходе $U_{ст}$ останется почти неизменным. При понижении напряжения U ток $I_{ст}$ резко падает, падение напряжения на R уменьшается, а напряжение $U_{ст}$ опять остается почти неизменным.



Фиг. 32. Схема стабилизатора напряжения с лампами тлеющего разряда типа СГ-1П.

Предположим теперь, что ток нагрузки $I_н$ увеличился вследствие уменьшения сопротивления нагрузки $R_н$. Это вызовет уменьшение тока $I_{ст}$ через газовый стабилизатор почти на ту же величину, на которую увеличился ток нагрузки $I_н$. В результате падение напряжения на сопротивлении R почти не изменится, а следовательно, не изменится и напряжение $U_{ст}$ на выходе стабилизатора.

В действительности напряжение $U_{ст}$ несколько понижается, чем и объясняется уменьшение тока через газовый стабилизатор. Однако это понижение напряжения будет весьма незначительно и составит не более 1—3% при изменениях тока нагрузки на 30—70%.

Уменьшение тока нагрузки $I_н$ вызывает соответствующее увеличение тока через газовый стабилизатор, что опять-таки сохранит выходное напряжение $U_{ст}$ почти неизменным.

Стабилизаторы напряжения, собранные по схемам фиг. 31 и 32, нельзя включать без нагрузок, так как это вызовет большой ток через газовые стабилизаторы и выведет их из строя.

Чем меньше ток нагрузки $I_н$ и ток через лампу $I_{ст}$ и чем больше напряжение на входе U, тем лучше стабилизирующее действие рассмотренных схем. Однако увеличение входного напряжения U более чем вдвое по сравнению с выходным напряжением $U_{ст}$ ухудшает к. п. д. схемы стабилизатора. С другой стороны, величина U должна быть достаточна для зажигания газового стабилизатора. В случае последовательного включения газовых стабилизаторов напряжение зажигания равно сумме напряжений горения всех стабилизаторов плюс наибольшая разность между напряжениями зажигания и горения одного из включенных стабилизаторов. У существующих ламп эта разность составляет от 22 до 30 *в*. Для облегчения зажигания последовательно включенных газовых стабилизаторов рекомендуется шунтировать одну из ламп сопротивлением 0,2—0,3 *мгом*.

Коэффициент стабилизации устройств с газовыми стабилизаторами K показывает, во сколько раз процентное изменение выходного напряжения $U_{ст}$ меньше процентного изменения входного напряжения U (или напряжения сети).

K можно подсчитать по формуле

$$K = \frac{U_{ст}(n-1)}{nR_д(I_{ст}+I_н)}, \qquad (6)$$

где $U_{ст}$ — выходное напряжение, *в*;

$n = \frac{U}{U_{ст}}$ (величина n обычно берется в пределах от 1,3 до 2);

$R_д$ — динамическое сопротивление газового стабилизатора, *ом*;

$I_{ст}$ и $I_н$ — ток через лампу и ток нагрузки, *а*.

Значения $R_д$ указаны в табл. 3. Если несколько стабилизаторов включено последовательно (фиг. 32,*а*), то берется сумма динамических сопротивлений всех стабилизаторов. Очевидно, что чем меньше $R_д$, тем выше коэффициент стабилизации.

Ток через лампу I_{cm} рекомендуется выбирать в пределах от 10 до 20 *ма* в зависимости от заданных колебаний входного напряжения U: малым колебаниям входного напряжения соответствует меньшее значение I_{cm}.

Зная входное напряжение U и токи I_{cm} и $I_н$, можно найти величину ограничивающего сопротивления R:

$$R = \frac{U - U_{cm}}{I_{cm} + I_н} = \frac{U_{cm}(n-1)}{I_{cm} + I_н}. \quad (7)$$

При расчете схем фиг. 31 и 32 необходимо проверить, не выходят ли крайние значения токов через газовый стабилизатор за пределы допустимых токов для данного типа лампы.

Максимальный ток протекает через лампу при максимальном входном напряжении

$$I_{cm.макс} = I_{cm} + \frac{U}{R}\frac{\beta}{100}, \quad (8)$$

а минимальный ток — при минимальном входном напряжении

$$I_{cm.мин} = I_{cm} - \frac{U}{R}\frac{\alpha}{100}, \quad (9)$$

где I_{cm} — ток через лампу при номинальном входном напряжении, *а*;
U — номинальное входное напряжение, *в*;
R — ограничивающее сопротивление в схеме стабилизатора [см. формулу (7)];
α — понижение напряжения U (или сети) в процентах от номинала;
β — повышение напряжения U (или сети) в процентах от номинала.

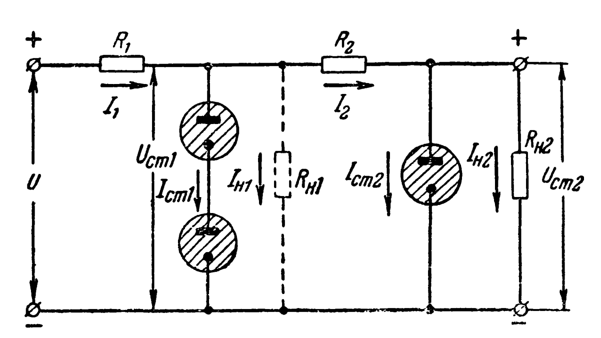
Проверка величин максимального и минимального токов позволяет установить правильность выбора тока через лампу I_{cm} при номинальном входном напряжении.

Стабилизаторы по схемам фиг. 31 и 32 пригодны при токах нагрузки не выше 25—30 *ма*. Дальнейшее увеличение тока нагрузки быстро снижает коэффициент стабилизации K, который обычно лежит в пределах от 8 до 20.

Следует всегда иметь в виду, что стабилизаторы обладают свойствами сглаживающих фильтров: пульса-

ция на выходе схемы уменьшается примерно в K раз по сравнению с пульсацией на входе.

Для увеличения коэффициента стабилизации K иногда применяют так называемую каскадную схему стабилизации, состоящую из двух последовательно включенных схем по типу показанных на фиг. 31 и 32. Каскадная схема изображена на фиг. 33. Ясно, что выходное напряжение первого каскада U_{cm1} должно быть больше выходного напряжения второго каскада U_{cm2}. При этом вовсе не обязательно включать в первый каскад два газовых



Фиг. 33. Каскадная схема стабилизатора напряжения.

стабилизатора, как это показано на фиг. 33. Так, например, в первый каскад может быть включен стабилизатор типа СГ-4С, а во второй — стабилизатор типа СГ-3С или СГ-2С.

Если ток нагрузки $I_{н_2}$ второго каскада невелик, то одновременно с использованием высокостабильного напряжения U_{cm_2} можно использовать менее стабильное напряжение U_{cm_1}, включив нагрузку, как это показано пунктиром на фиг. 33.

Коэффициент стабилизации каскадной схемы равен произведению коэффициентов стабилизации первого и второго каскадов:

$$K = K_1 \cdot K_2.$$

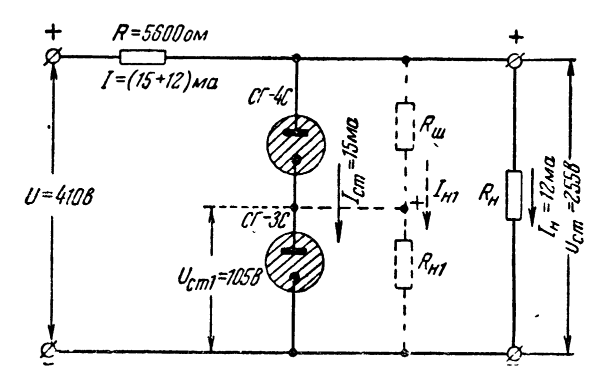
Расчет каждого каскада в отдельности производится по вышеприведенным формулам. При этом для второго каскада входным напряжением будет практически по-

стоянное напряжение $U_{ст_1}$, а полный ток нагрузки для первого каскада будет

$$I_н = I_{н_1} + I_{ст_2} + I_{н_2}.$$

Пример 6. Требуется рассчитать стабилизатор напряжения на 255 *в* при токе нагрузки 12 *ма*. Выпрямитель, питающий схему стабилизатора, работает от сети переменного напряжения, которое колеблется в пределах $\pm$ 10%.

1. Величина тока нагрузки $I_н = 12$ *ма* позволяет применить схему с газовыми стабилизаторами напряжения СГ-4С и СГ-3С, включенными последовательно (фиг. 34).



Фиг. 34. Схема стабилизатора напряжения (к примеру 6).

Пунктиром показана схема включения дополнительной нагрузки.

2. Найдем коэффициент стабилизации схемы. Для этого выберем величину n, показывающую отношение входного напряжения к выходному, и ток $I_{ст}$ через газовый стабилизатор при номинальном напряжении питающей сети:

$$n = 1{,}6; \quad I_{ст} = 15 \text{ ма}.$$

Из табл. 3 находим, что динамическое сопротивление лампы СГ-4С $R_д = 200$ *ом*, а динамическое сопротивление лампы СГ-3С $R_д = 100$ *ом*.

Тогда коэффициент стабилизации схемы по формуле (6) будет

$$K = \frac{U_{ст}(n-1)}{nR_д(I_{ст}+I_н)} = \frac{255\,(1{,}6-1)}{1{,}6\,(200+100)\cdot(15+12)\cdot 10^{-3}} = 11{,}8.$$

На основании полученного значения K можно сказать, что при изменении напряжения сети (или входного напряжения U), например,

на 5% напряжение на выходе изменится на $\frac{5}{11,8} = 0,42\%$. Если эта величина почему-либо не удовлетворяет требованиям качества стабилизации, то K можно немного повысить, увеличив n.

3. По формуле (7) определяем величину R:

$$R = \frac{U_{cm}(n-1)}{I_{cm}+I_{н}} = \frac{255\,(1,6-1)}{(15+12)\cdot 10^{-3}} \approx 5\,600 \text{ ом}.$$

4. Мощность, рассеиваемая на сопротивлении:

$$P_R = (I_{cm}+I_{н})^2 R = [(15+12)\cdot 10^{-3}]^2 \cdot 5\,600 = 4,1 \text{ вт}.$$

5. Необходимое входное напряжение

$$U = nU_{cm} = 1,6\cdot 255 \approx 410 \text{ в}.$$

Это напряжение (410 *в*) должно быть получено от выпрямителя, питающего схему стабилизатора.

6. Проверим пределы изменения тока через газовые стабилизаторы по формулам (8) и (9). Из задания известно, что процентные изменения напряжения сети равны

$$\alpha = \beta = 10.$$

Следовательно:

$$I_{cm.\,макс} = I_{cm} + \frac{U}{R}\frac{\beta}{100} = 15\cdot 10^{-3} + \frac{410}{5\,600}\cdot\frac{10}{100} =$$

$$= 22,3\cdot 10^{-3}\ a = 22,3 \text{ ма};$$

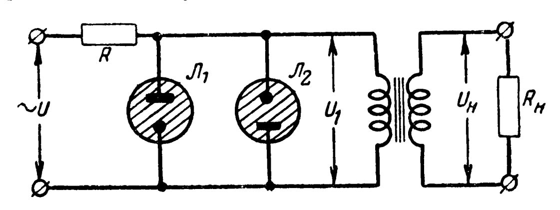
$$I_{cm.мин} = I_{cm} - \frac{U}{R}\frac{\alpha}{100} = 15\cdot 10^{-3} - \frac{410}{5\,600}\cdot\frac{10}{100} = 7,7\cdot 10^{-3}\ a = 7,7 \text{ ма}.$$

Таким образом, изменения тока через газовые стабилизаторы не выходят за допустимые пределы (5 — 30 *ма* из табл. 3). Если бы величина максимального или минимального тока через лампы выходила за допустимые пределы, то нужно было бы выбрать другое значение тока I_{cm}: если $I_{cm.\,макс}$ больше 30 — 40 *ма*, I_{cm} следует уменьшить; если же $I_{cm.мин}$ меньше 5 — 6 *ма*, то I_{cm} следует увеличить. Ограничить изменения тока через газовые стабилизаторы можно также, задавшись меньшими изменениями напряжения питающей сети (α и β).

В случае необходимости можно использовать выбранную схему фиг. 34 для получения двух стабилизованных напряжений одновременно (U_{cm} и U_{cm_1}). Величина дополнительного напряжения U_{cm_1} в нашем примере может быть равна либо +150 *в*, либо +105 *в* в зависимости от того, который из двух газовых стабилизаторов будет подключен к общему „минусу“ стабилизованных напряжений. Для того чтобы через оба газовых стабилизатора протекал один и тот же ток I_{cm}, параллельно верхней лампе следует включить сопротивление $R_{ш}$, через которое будет протекать ток дополнительной нагрузки $I_{н_1}$ (см. пунктир на фиг. 34). Расчет схемы стабилизатора в этом случае следует вести на суммарный ток нагрузки $I_{н} + I_{н_1}$. Схема фиг. 34 будет отличаться от схемы с обычным делителем напряжения (потенциометром) тем, что при изменении тока $I_{н_1}$ через дополнительную нагрузку $R_{н_1}$ напряжение на ней будет поддерживаться неизменным.

В последнее время получают распространение газовые стабилизаторы с коронным разрядом, позволяющие стабилизовать постоянное напряжение порядка нескольких киловольт при токах менее одного миллиампера. Эти стабилизаторы могут быть с успехом использованы для стабилизации анодных напряжений электронно-лучевых трубок, а также и в других приборах, где требуется стабилизация высоких напряжений при малых токах нагрузки.

Режим коронного разряда отличается от режима тлеющего разряда, используемого в обычных газовых стабилиза-



Фиг. 35. Схема включения газовых стабилизаторов для стабилизации переменного напряжения.

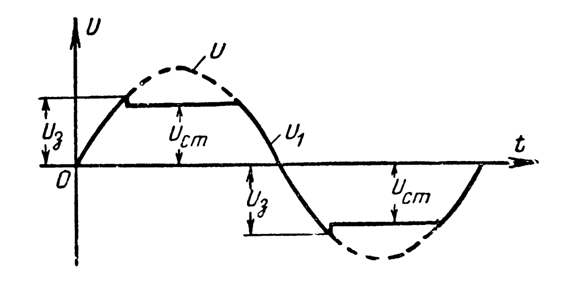
торах, давлением и составом наполняющего газа. Устройство электродов в стабилизаторах с коронным разрядом мало отличается от стабилизаторов с тлеющим разрядом. Схемы использования стабилизаторов с коронным разрядом подобны схемам, приведенным на фиг. 31 и 32.

В заключение необходимо упомянуть о схеме, позволяющей стабилизовать переменное напряжение (фиг. 35), где газовые стабилизаторы $Л_1$ и $Л_2$ включены параллельно первичной обмотке трансформатора так, что анод $Л_1$ и катод $Л_2$ присоединены к одному концу первичной обмотки, а катод $Л_1$ и анод $Л_2$ — к другому. Ограничивающее сопротивление R является общим для обоих газовых стабилизаторов.

Рассмотрим принцип действия этого стабилизатора. Одно из свойств газового стабилизатора состоит в том, что его напряжение зажигания повышается, когда положительный полюс питающего напряжения подан на катод, а отрицательный — на анод, т. е. при перемене нормальной полярности на обратную. Если в данный момент верхний конец первичной обмотки трансформатора имеет положительный потенциал по отношению к нижнему концу, то зажжется только стабилизатор $Л_1$, имеющий в этом случае более низ-

кое напряжение зажигания. После зажигания стабилизатора $Л_1$ напряжение на нем падает до напряжения его горения, что еще более затрудняет возможность одновременного зажигания стабилизатора $Л_2$. Когда положительный потенциал будет на нижнем конце трансформатора, произойдет зажигание стабилизатора $Л_2$, а $Л_1$ работать не будет.

Изменение напряжения на первичной обмотке трансформатора U_1 иллюстрируется графиком фиг. 36. В течение первого полупериода напряжение плавно возра-



Фиг. 36. Форма кривой стабилизованного напряжения U_1 в схеме фиг. 35.

стает до напряжения зажигания $U_з$ стабилизатора $Л_1$. После его зажигания напряжение на трансформаторе резко падает до напряжения горения $U_{ст}$ и остается почти неизменным до момента, когда напряжение сети U оказывается недостаточным для поддержания горения стабилизатора. Стабилизатор $Л_1$ гаснет и напряжение на обмотке плавно спадает до нуля. В течение второго полупериода повторяется такой же процесс со стабилизатором $Л_2$.

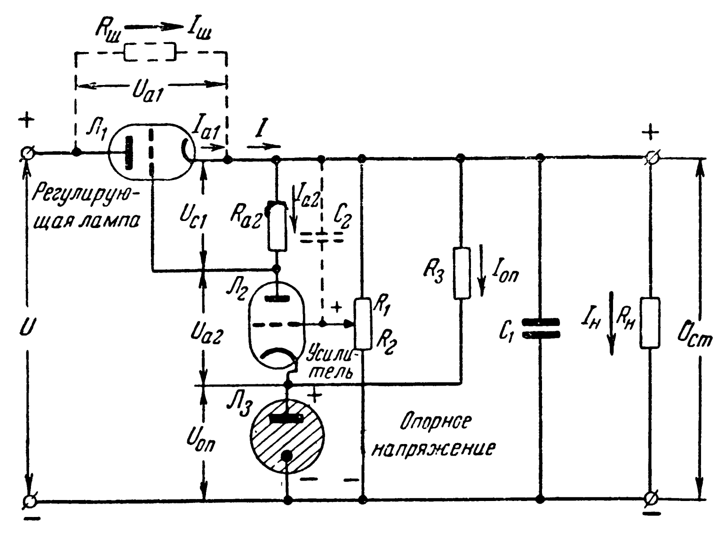
Так как напряжение на первичной обмотке трансформатора U_1 определяется в основном напряжением горения $U_{ст}$ газовых стабилизаторов (плоские части кривой фиг. 36), то изменения амплитуды питающего напряжения U будут сравнительно мало сказываться и на величине выходного напряжения $U_н$.

Форма кривой выходного напряжения $U_н$ будет заметно искажена, так как она подобна форме кривой напряжения U_1 (фиг. 36).

Схема фиг. 35 может быть использована в маломощных устройствах. Стабильность выходного напряжения в этой схеме невысока. Ограничивающее сопротивление R нужно выбрать таким, чтобы ток через газовые стабилизаторы не превышал допустимого.

ЭЛЕКТРОННЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Электронные стабилизаторы напряжения являются наиболее совершенными стабилизаторами. Они применяются как в промышленных, так и в лабораторных устройствах. Коэффициент стабилизации этих схем K легко сделать значительно выше, чем у схем с бареттерами или с газовыми



Фиг. 37. Схема электронного стабилизатора напряжения.

стабилизаторами. Значение коэффициента стабилизации K у электронных стабилизаторов колеблется от 50 до 1 000. Величина тока нагрузки в схемах с электронной стабилизацией принципиально не ограничена.

Существует довольно много разновидностей схем с электронной стабилизацией напряжения. Мы рассмотрим только основные и наиболее часто встречающиеся схемы стабилизаторов с отрицательной обратной связью. Первая из этих схем представлена на фиг. 37. Она состоит из регулирую-

щей лампы $Л_1$, усилителя постоянного тока с лампой $Л_2$, газового стабилизатора $Л_3$, служащего в качестве источника опорного напряжения $U_{оп}$ и делителя напряжения, состоящего из сопротивлений R_1 и R_2. Сопротивление R_3 служит для ограничения тока через газовый стабилизатор $Л_3$.

Регулирующая лампа $Л_1$, включенная последовательно с нагрузкой, выполняет роль переменного сопротивления, величина которого изменяется в зависимости от входного напряжения и тока нагрузки. Воздействие на регулирующую лампу осуществляется через цепь отрицательной обратной связи, в которую входит усилитель постоянного тока с лампой $Л_2$.

Рассмотрим принцип действия схемы фиг. 37. Предположим, что напряжение на входе стабилизатора U увеличилось вследствие возрастания напряжения питающей сети или из-за уменьшения тока нагрузки $I_н$. При этом напряжение на выходе стабилизатора должно несколько возрасти, что уменьшит отрицательный потенциал на сетке усилительной лампы $Л_2$. Анодный ток лампы $Л_2$, проходящий через сопротивление R_{a_2}, увеличится и вызовет увеличение отрицательного смещения на сетке регулирующей лампы $Л_1$. Это, в свою очередь, вызовет повышение сопротивления регулирующей лампы для протекающего через нее тока и увеличит падение напряжения на ней. Падение напряжения на регулирующей лампе увеличится почти настолько, насколько увеличилось входное напряжение U. В результате напряжение на выходе стабилизатора $U_{ст}$ почти не изменится.

При уменьшении входного напряжения U из-за уменьшения напряжения сети или увеличения тока нагрузки отрицательный потенциал на сетке $Л_2$ увеличивается, а ее анодный ток уменьшается, что вызывает уменьшение отрицательного смещения на сетке регулирующей лампы $Л_1$. Сопротивление регулирующей лампы падает, и падение напряжения на ней уменьшается на величину, почти равную уменьшению входного напряжения U. В результате выходное напряжение $U_{ст}$ останется почти без изменений.

Через регулирующую лампу проходит весь ток стабилизатора I, состоящий в основном из тока нагрузки $I_н$ и тока через газовый стабилизатор $Л_3$ (током через лам-

пу $Л_2$ и через делитель R_1R_2 обычно можно пренебречь). При этом мощность рассеяния на аноде регулирующей лампы не должна превышать допустимой для данной лампы величины.

В качестве регулирующих ламп обычно применяются мощный триод 6С4С, двойной триод 6Н5С или тетроды и пентоды в триодном соединении, например, 6П1П, 6П6С, 6П3С, ГУ-50. Внутреннее сопротивление регулирующей лампы должно быть минимальным. Поэтому тетроды и пентоды чаще всего используются в триодном соединении, что значительно уменьшает их внутреннее сопротивление.

Часто для уменьшения мощности рассеяния на аноде регулирующей лампы параллельно ей включают шунтирующее сопротивление $R_ш$, через которое протекает от 20 до 50% общего тока I стабилизатора (см. пунктир на фиг. 37). Следует иметь в виду, что включение шунтирующего сопротивления несколько снижает коэффициент стабилизации схемы (в 1,3—1,5 раза). Если включение $R_ш$ недостаточно снижает мощность рассеяния на аноде лампы, то следует включить несколько регулирующих ламп параллельно. Сопротивление $R_ш$ при этом может оказаться ненужным.

Регулирующая лампа должна работать только при отрицательном смещении на управляющей сетке. При появлении токов сетки работа стабилизатора резко нарушается. Падение напряжения U_{a_1} на регулирующей лампе составляет обычно от 100 до 250 *в* в зависимости от типа лампы и от величины входного напряжения U. Очевидно, что чем меньше это падение напряжения, тем выше к. п. д. схемы стабилизатора. Однако уменьшать U_{a_1} можно только до такой величины, при которой смещение на сетке регулирующей лампы при заданном максимальном токе через нее будет еще оставаться отрицательным: $U_{c_1} = -(1 \div 3)$ *в*.

Каскад усиления постоянного тока на лампе $Л_2$ усиливает изменения постоянного напряжения на выходе стабилизатора и подает их на сетку регулирующей лампы $Л_1$. Чем больше коэффициент усиления этого каскада, тем выше коэффициент стабилизации схемы. Очевидно, что чем больше сопротивление анодной на-

грузки R_{a_2} усилителя, тем выше коэффициент усиления каскада. Величину R_{a_2} выбирают в 2—5 раз больше величины внутреннего сопротивления усилительной лампы R_{i_2}. Анодный ток I_{a_2} усилительной лампы $Л_2$ составляет обычно несколько десятков или сотен микроампер. Сопротивление R_{a_2} желательно выбирать с таким расчетом, чтобы минимальный анодный ток I_{a_2} был не ниже 10—20 *мка*, а отрицательное смещение на сетке — не менее 0,5—1 *в*.

В качестве усилительных ламп применяются триоды с большим коэффициентом усиления, например 6Ф5, 6Г7, 6Н9С, 6Н2П или пентоды 6Ж8, 6К3, 6Ж4 и др. Следует иметь в виду, что питание накалов усилительной и регулирующей ламп следует производить от разных обмоток, так как между катодами этих ламп в схеме стабилизатора существует большая разность потенциалов, доходящая до 150 *в* и более.

В схемах электронных стабилизаторов газовый стабилизатор $Л_3$ служит не в качестве стабилизатора напряжения, как в схемах фиг. 31 и 32, а в качестве источника стабильного напряжения, называемого „опорным", относительно которого изменяется потенциал сетки усилительной лампы $Л_2$. Так как в данном случае газовый стабилизатор выполняет только роль источника напряжения, то в некоторых схемах электронных стабилизаторов он заменяется сухой батареей, дающей более стабильное напряжение.

Опорное напряжение $U_{оп}$ включено навстречу напряжению, падающему на сопротивлении R_2 делителя (фиг. 37), что обеспечивает необходимое отрицательное смещение на сетке усилительной лампы $Л_2$ (около 1—3 *в*). Чем больше величина опорного напряжения, тем лучше стабилизирующее действие схемы. Однако величину $U_{оп}$ надо выбрать так, чтобы анодное напряжение U_{a_2} лампы усилителя было не меньше требуемого для ее нормальной работы. В качестве источников опорного напряжения обычно используют газовые стабилизаторы типов СГ-4С, СГ-1П, СГ-3С и СГ-2С.

Расчет сопротивления R_3, ограничивающего ток через газовый стабилизатор $Л_3$ (фиг. 37), не представляет трудностей: напряжение на нем равно разности между

выходным напряжением U_{cm} и опорным напряжением U_{on}, а ток I_{on} через стабилизатор выбирается от 8 до 12 *ма*. Отсюда величина сопротивления

$$R_3 = \frac{U_{cm} - U_{on}}{I_{on}}. \tag{10}$$

Сопротивление R_2 плеча делителя можно определить из формулы

$$R_2 = \frac{U_{on}}{U_{cm}}(R_1 + R_2). \tag{11}$$

Полное сопротивление делителя $R_1 + R_2$ выбирают из расчета, чтобы ток через делитель не превышал 1—2 *ма*. Желательно, чтобы делитель был выполнен в виде потенциометра. Это даст возможность точнее установить величину требуемого выходного напряжения.

Пример 7. Требуется выбрать регулирующую лампу для стабилизатора напряжения с общим током нагрузки $I = 80$ *ма*, определить минимально допустимое падение напряжения на лампе U_{a_1} и рассчитать шунтирующее сопротивление $R_ш$, если оно окажется необходимым.

Для заданного тока нагрузки чаще всего применяют тетрод 6П3С в триодном соединении (вторая от катода сетка соединена с анодом); анодные характеристики тетрода 6П3С при триодном включении представлены на фиг. 38. Из этих характеристик находим, что минимально допустимое анодное напряжение U_{a_1} при токе 80 *ма* составляет 150 *в*. При этом анодном напряжении отрицательное смещение на сетке регулирующей лампы $U_{c_1} = -1$ *в*. Дальнейшее уменьшение анодного напряжения приведет к недопустимому уменьшению отрицательного смещения. Однако мощность рассеяния на аноде при напряжении $U_{a_1} = 150$ *в* составляет

$$P_{a_1} = U_{a_1} I = 150 \cdot 0{,}08 = 12 \text{ вт},$$

а для лампы 6П3С в триодном режиме допустимо рассеивать на аноде всего лишь 10 *вт*. Поэтому целесообразно часть тока (например, 30 *ма*) пропустить через шунтирующее сопротивление $R_ш$. Тогда через лампу будет проходить ток $I_{a_1} = I - I_ш = 80 - 30 = 50$ *ма*. Минимальное напряжение анода U_{a_1} можно при этом принять равным 120 *в*. Из семейства анодных характеристик (фиг. 38) находим, что при $I_{a_1} = 50$ *ма* и $U_{a_1} = 120$ *в* смещение $U_{c_1} = -3$ *в*, что допустимо.

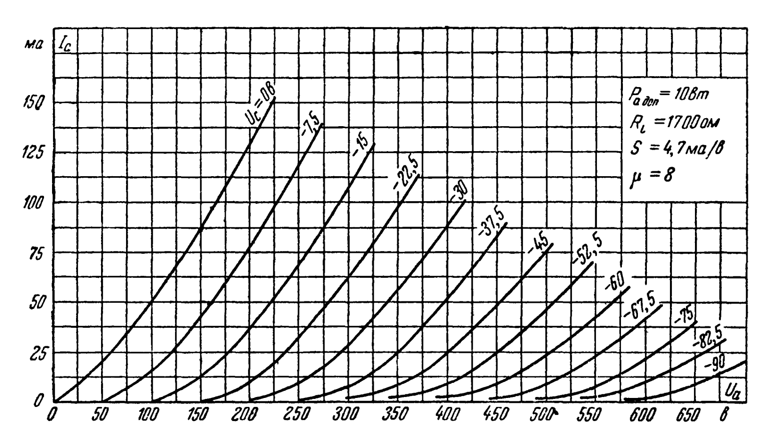
Мощность рассеяния на аноде составит

$$P_{a_1} = 120 \cdot 0{,}05 = 6 \text{ вт} < 10 \text{ вт}.$$

Сопротивление шунта (см. схему фиг. 37)

$$R_ш = \frac{U_{a_1}}{I_ш} = \frac{120}{0{,}03} = 4\,000 \text{ ом.}$$

Пример 8 Выбрать анодное сопротивление R_{a_2} каскада усилителя постоянного тока на лампе 6Ф5, а также определить величину анодного тока I_{a_2} и необходимое смещение на сетке U_{c_2}, если известно, что анодное напряжение на лампе усилителя $U_{a_2} = 120$ *в*, а смещение на сетке регулирующей лампы $U_{c_1} = -20$ *в*.



Фиг. 38. Анодные характеристики тетрода 6П3С при триодном включении (экранная сетка соединена с анодом).

1. Из семейства анодных характеристик лампы 6Ф5 (фиг. 39) находим величину внутреннего сопротивления $R_{i_2} = 170\,000$ *ом*. Выбираем величину анодного сопротивления

$$R_{a_2} = 3R_{i_2} = 3 \cdot 170\,000 \approx 500\,000 \text{ ом.}$$

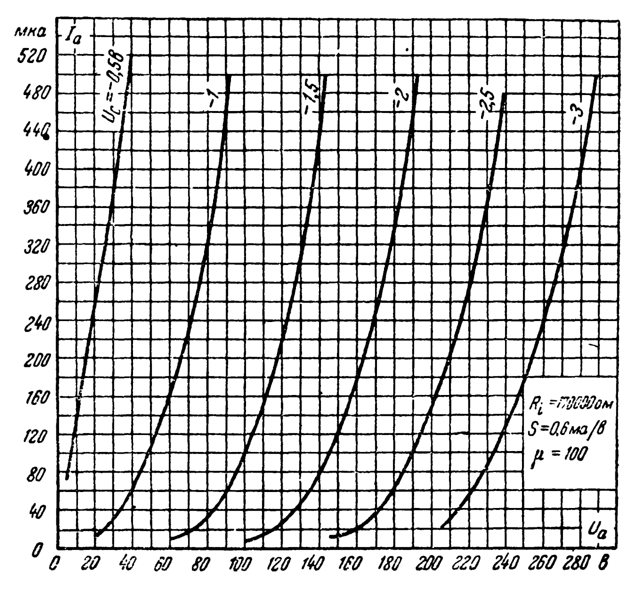
2. Величину анодного тока I_{a_2} можно определить, зная падение напряжения на анодном сопротивлении и величину этого сопротивления. Из схемы фиг. 37 видно, что падение напряжения на анодном сопротивлении численно равно смещению U_{c_1} на сетке регулирующей лампы. Поэтому анодный ток через лампу

$$I_{a_2} = \frac{|U_{c_1}|}{R_{a_2}} = \frac{20}{500\,000} = 40 \cdot 10^{-6}\, a = 40 \text{ мка.}$$

Обозначение $|U_{c_1}|$ показывает, что величину U_{c_1} следует брать при расчете без учета знака (в данном случае минуса).

3. Из анодных характеристик лампы (фиг. 39) находим, что при $U_{a_2} = 120$ *в* и $I_{a_2} = 40$ *мка* смещение на сетке $U_{c_2} = -1{,}9$ *в*, что вполне приемлемо.

Пример 9. Выбрать газовый стабилизатор и рассчитать величину сопротивления R_3 и делителя R_1R_2 для схемы электронного стабилизатора с выходным напряжением $U_{cm} = 200$ *в*. Минимально допустимое анодное напряжение усилительной лампы $Л_2$ $U_{a_2} = 60$ *в*; напряжение смещения на сетке регулирующей лампы $U_{c_1} = -20$ *в*.



Фиг. 39. Анодные характеристики триода 6Ф5.

1. Из схемы фиг. 37 следует, что опорное напряжение при указанных выше условиях должно быть не более

$$U_{on} = U_{cm} - (U_{a_2} + |U_{c_1}|) = 200 - (60 + 20) = 120 \text{ в}.$$

Так как газового стабилизатора на 120 *в* нет, выбираем лампу СГ-3С, имеющую ближайшее меньшее напряжение горения 105 *в* (на аноде лампы $Л_2$ будет при этом на 15 *в* больше: $U_{a_2} = 75$ *в*).

2. Ток через газовый стабилизатор выбираем $I_{on} = 10$ *ма*. Тогда сопротивление R_3 по формуле (10) будет

$$R_3 = \frac{U_{cm} - U_{on}}{I_{on}} = \frac{200 - 105}{10 \cdot 10^{-3}} \approx 10\,000 \text{ ом}.$$

3. Сопротивление делителя R_1R_2 определяем, полагая ток через делитель равным 1 *ма*.

Тогда

$$R_1 + R_2 = \frac{U_{cm}}{1 \cdot 10^{-3}} = \frac{200}{1 \cdot 10^{-3}} = 200\,000 \text{ ом}.$$

4. Сопротивление R_2 определяем по формуле (11):

$$R_2 = \frac{U_{on}}{U_{cm}} (R_1 + R_2) = \frac{105}{200} 200\,000 \approx 100\,000 \text{ ом}.$$

Следовательно:

$$R_1 = 200\,000 - 100\,000 = 100\,000 \text{ ом}.$$

Конденсатор C_1, включенный на выходе стабилизатора (фиг. 37), служит для увеличения устойчивости работы схемы. При непродуманном монтаже схема электронного стабилизатора склонна к самовозбуждению, так как в нее входит усилитель с довольно большим коэффициентом усиления. Как уже было указано, причиной самовозбуждения схем с отрицательной обратной связью является непроизвольное появление положительной обратной связи. Включение конденсатора C_1 емкостью 2—4 *мкф*, уменьшающего усиление на частоте самовозбуждения, устраняет это неприятное явление.

Схема электронного стабилизатора одновременно является хорошим сглаживающим фильтром. Действительно, если схема стабилизатора поддерживает выходное напряжение постоянным при медленных изменениях входного напряжения, то очевидно, что она будет поддерживать выходное напряжение неизменным и при быстрых колебаниях входного напряжения, так как схема стабилизатора практически безинерционна.

Пульсацию же выпрямленного напряжения можно рассматривать как быстрые изменения входного напряжения U с частотой удвоенной или равной частоте питающей сети. Пульсация выпрямленного напряжения на выходе стабилизатора ослабляется в K раз по сравнению с пульсацией на входе (K — коэффициент стабилизации). Пульсация ослабляется еще больше (приблизительно в $2K$ раз), если между «плюсом» выходного напряжения и сеткой усилительной лампы $Л_2$ (фиг. 37) включить конденсатор C_2, показанный пунктиром. Величина емкости этого конденсатора берется обычно в пределах 0,1—0,3 *мкф*.

Коэффициент стабилизации электронного стабилизатора можно подсчитать по приближенной формуле

$$K = \frac{U_{on}}{U_{cm}} \mu K_y \frac{R_ш}{R_ш + R_{i_1}}, \qquad (12)$$

где μ — коэффициент усиления регулирующей лампы;

K_y — коэффициент усиления усилителя постоянного тока;

R_{i_1} — внутреннее сопротивление регулирующей лампы (или ламп), *ом.*

Коэффициент стабилизации K показывает, во сколько раз абсолютное изменение выходного напряжения U_{cm} меньше абсолютного изменения входного напряжения U.

Иногда интересно знать величину внутреннего сопротивления стабилизатора Z_i. Чем меньше величина внутреннего сопротивления, тем меньше будет изменяться выходное напряжение U_{cm} при изменении тока нагрузки $I_н$. В электронных стабилизаторах величина Z_i лежит в пределах от нескольких единиц до нескольких десятков ом.

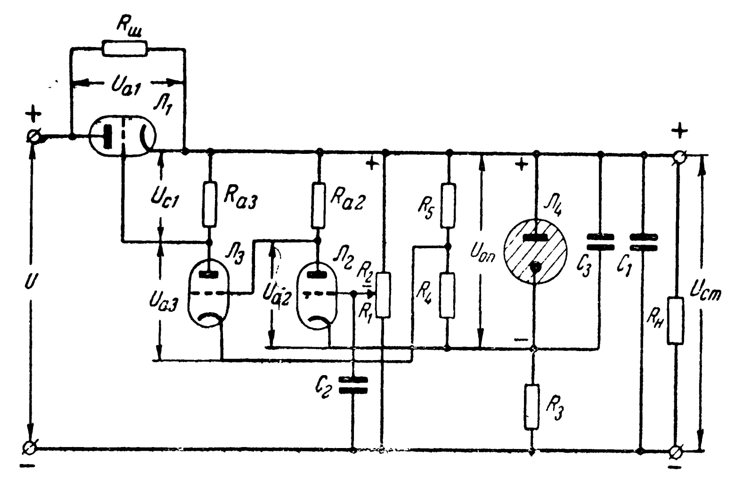
Значение Z_i можно найти из формулы

$$Z_i = \frac{R_{i_1}}{K}. \qquad (13)$$

Вторая, часто применяемая схема электронного стабилизатора напряжения представлена на фиг. 40. Схема имеет двухкаскадный усилитель постоянного тока, что увеличивает ее коэффициент стабилизации по сравнению со схемой фиг. 37, имеющей однокаскадный усилитель.

Для нормальной работы схемы фиг. 40 фаза напряжения, подаваемого на сетку первого каскада усилителя, должна быть противоположна фазе напряжения, подаваемого на сетку усилителя в схеме фиг. 37. Из рассмотрения работы схемы фиг. 37 мы знаем, что, например, при увеличении входного напряжения U отрицательное смещение на сетке усилительной лампы уменьшается. Однокаскадный усилитель поворачивает фазу усиливаемого напряжения на 180°, в результате чего отрицательное смещение на сетке регулирующей лампы увеличивается; это и требуется при повышении входного напряжения. В схеме фиг. 40 при повышении входного напряжения отрицательное смещение на сетке первого каскада

должно увеличиться, а не уменьшиться, как в схеме фиг. 37, так как двухкаскадный усилитель поворачивает фазу на 360°. При этом отрицательное смещение на сетке регулирующей лампы также увеличится, что будет соответствовать правильной работе схемы при повышении входного напряжения. Нужное изменение фазы напряжения, подаваемого на сетку усилителя, достигается соответствующей схемой включения опорного напряжения ($Л_4$).



Фиг. 40. Схема электронного стабилизатора напряжения с двухкаскадным усилителем постоянного тока.

Разберем подробнее работу схемы фиг. 40. Предположим, что увеличилось входное напряжение U. При этом возрастает падение напряжения на сопротивлении делителя R_2. Смещение на сетке лампы $Л_2$ первого каскада усилителя, которое представляет собой разность между напряжением на R_2 и опорным напряжением $U_{оп}$, станет более отрицательным. Анодный ток этой лампы и падение напряжения на анодном сопротивлении R_{a_2} уменьшатся, вследствие чего анод лампы $Л_2$ станет более положительным. Это вызовет уменьшение отрицательного потенциала сетки лампы $Л_3$ второго каскада усилителя. Анодный ток этой лампы и падение напряжения на сопротивлении R_{a_3} увеличатся, что вызовет увеличение отрицательного смещения на сетке регулирующей лампы $Л_1$. Сопротивление регулирующей лампы

повысится, падение напряжения на ней возрастет, а напряжение $U_{ст}$ на выходе схемы останется почти без изменений. Легко проследить, что при уменьшении входного напряжения U сопротивление регулирующей лампы будет уменьшаться.

С помощью сопротивлений R_4 и R_5 устанавливаются необходимые анодные напряжения на лампах $Л_2$ и $Л_3$:

$$U_{a_2} = U_{оп} \frac{R_4}{R_4 + R_5}; \tag{14}$$

$$U_{a_3} = U_{оп} \frac{R_5}{R_4 + R_5} - |U_{c_1}|. \tag{15}$$

Анодные токи ламп $Л_2$ и $Л_3$ соответственно равны

$$I_{a_2} = \frac{U_{a_3} + |U_{c_1}|}{R_{a_2}}; \tag{16}$$

$$I_{a_3} = \frac{|U_{c_1}|}{R_{a_3}}. \tag{17}$$

В качестве усилительных ламп $Л_2$ и $Л_3$ удобно применять двойные триоды с разделенными катодами, например 6Н9С или 6Н2П.

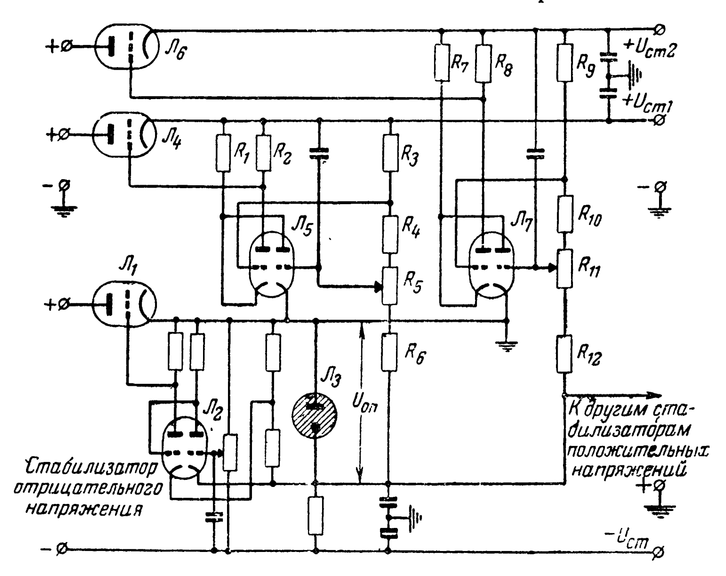
Ток, протекающий через сопротивления R_4 и R_5, выбирается в пределах 3—5 *ма*. Ток через газовый стабилизатор $Л_4$ обычно равен 8—12 *ма*. Сопротивление R_3 рассчитывается на суммарный ток лампы $Л_4$ и ток через R_4 и R_5. Напряжение на сопротивлении R_3 равно

$$U_{ст} - U_{оп}.$$

Конденсаторы C_1 (2—4 *мкф*) и C_3 (0,1—0,3 *мкф*) служат для предотвращения самовозбуждения схемы. Конденсатор C_2 (0,1—0,3 *мкф*) служит для уменьшения пульсации выходного напряжения. Остальные элементы схемы фиг. 40 выбираются из тех же соображений, что в схеме фиг. 37.

Коэффициент стабилизации K и внутреннее сопротивление стабилизатора Z_i определяются по ранее приведенным формулам (12) и (13). Схема с двумя каскадами усиления дает весьма высокий коэффициент стабилизации (порядка 1 000). Схемы стабилизаторов с бóльшим числом каскадов усиления почти не применяются.

Очень часто необходимо одновременно иметь как положительные, так и отрицательные (по отношению к „земле“) стабилизованные напряжения. В этих случаях в схемах стабилизаторов целесообразно использовать один общий источник опорного напряжения. Однако для этого необходимо изменить схему усилителя постоянного тока в стабилизаторах положительных напряжений. Измененная схема усилителя постоянного тока носит название схемы с последовательно включенными триодами.



Фиг. 41. Схемы электронных стабилизаторов с общим источником опорного напряжения.

На фиг. 41 приведены схемы трех стабилизаторов напряжения с общим источником опорного напряжения. Регулирующая лампа $Л_1$, усилительная лампа $Л_2$ и источник опорного напряжения — газовый стабилизатор $Л_8$ образуют обычную схему электронного стабилизатора с двухкаскадным усилителем постоянного тока (фиг. 40), у которой положительный полюс стабилизованного напряжения заземлен.

Регулирующая лампа $Л_4$ и усилитель на двойном триоде $Л_5$, собранный по схеме с последовательно включенными триодами, образуют стабилизатор положитель-

ного напряжения $+U_{cm1}$, а лампы $Л_6$ и $Л_7$, входящие в точно такую же схему, образуют стабилизатор положительного напряжения $+U_{cm2}$. Источником опорного напряжения для всех трех схем служит газовый стабилизатор $Л_3$. Как видно из схемы фиг. 41, газовый стабилизатор $Л_3$ может быть использован в качестве опорного напряжения и для большего числа аналогичных схем стабилизаторов положительных напряжений.

В случае увеличения выходного напряжения (например, $+U_{cm1}$) уменьшается отрицательное смещение на сетке лампы первого каскада усилителя (правый триод $Л_5$); анодный ток правого триода увеличивается, что уменьшает положительный потенциал катода лампы второго каскада усилителя (левый триод $Л_5$). Так как потенциал сетки лампы второго каскада относительно земли меняется значительно меньше, чем потенциал катода, то изменением потенциала сетки можно пренебречь. Поэтому уменьшение положительного потенциала катода лампы второго каскада (что эквивалентно уменьшению отрицательного потенциала сетки) вызовет увеличение анодного тока левого триода, а следовательно, увеличение отрицательного смещения на сетке регулирующей лампы $Л_4$ и снижение выходного напряжения $+U_{cm1}$ до заданной величины.

Из описания принципа действия схемы, между прочим, следует, что усилитель с двумя последовательно включенными триодами поворачивает фазу усиливаемого напряжения только на 180°, а не на 360°, как обычная двухкаскадная схема усилителя (фиг. 40).

Коэффициент усиления схемы с двумя последовательно включенными триодами приблизительно равен

$$K_y = SR_{a_2} \cdot 10^{-3}, \qquad (18)$$

где S — крутизна характеристики триода, *ма/в*;

R_{a_2} — сопротивление в цепи анода лампы второго каскада, *ом*.

Усиление усилителя с двумя последовательно включенными триодами больше усиления однокаскадной и меньше усиления двухкаскадной схемы (при одинаковых лампах и анодных нагрузках).

Коэффициент стабилизации схемы фиг. 41 можно подсчитать по формуле

$$K = \frac{U_{on}}{U_{cm}+U_{on}}\,\mu K_{y}\,\frac{R_{ш}}{R_{ш}+R_{i_1}}, \qquad (19)$$

где обозначения те же, что в формуле (12).

Если шунтирующее сопротивление $R_{ш}$ отсутствует ($R_{ш} = \infty$), то коэффициент $\frac{R_{ш}}{R_{ш}+R_{i_1}}$ равен единице.

В качестве примера в табл. 4 приведены данные схемы фиг. 41 для стабилизованных напряжений +150 и +300 *в*.

Таблица 4

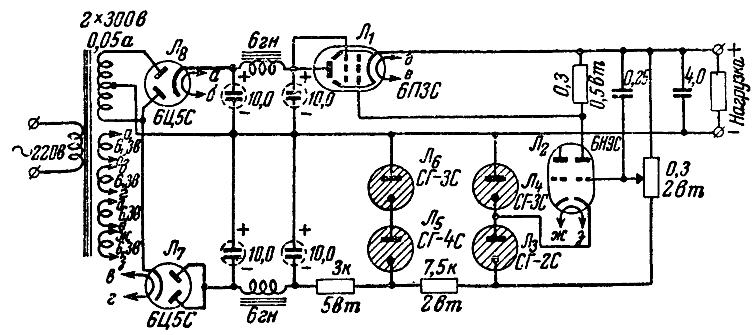
Основные данные схемы фиг. 41

$+U_{cm_1} = +150$ *в*	$+U_{cm_2} = +300$ *в*
$Л_3$ — СГ-4С, СГ-1П или СГ-3С — общий источник опорного напряжения	
$Л_4$ — 6П3С, 6П6С, 6П1П или 6Н5С	$Л_6$ — 6П3С, 6П6С, 6П1П или 6Н5С
$Л_5$ — 6Н9С или 6Н2П	$Л_7$ — 6Н9С или 6Н2П
R_1 — 0,47 *мгом*, 1 *вт*	R_7 — 0,33 *мгом*, 1 *вт*
R_2 — 0,39 *мгом*, 1 *вт*	R_8 — 0,27 *мгом*, 1 *вт*
R_3 — 36 *ком*, 1 *вт*	R_9 — 91 *ком*, 1 *вт*
R_4 — 33 *ком*, 1 *вт*	R_{10} — 56 *ком*, 1 *вт*
R_5 — 10 *ком* (переменное), 1 *вт*	R_{11} — 10 *ком*, (переменное), 1 *вт*
R_6 — 68 *ком* (для СГ-4С и СГ-1П), 1 *вт*	R_{12} — 68 *ком* (для СГ-4С и СГ-1П), 1 *вт*
R_6 — 47 *ком* (для СГ-3С), 1 *вт*	R_{12} — 47 *ком* (для СГ-3С), 1 *вт*

Мы рассмотрели основные и наиболее часто применяемые схемы электронных стабилизаторов напряжения. Эти схемы предназначены для стабилизации напряжений от 120—150 до 600—800 *в*. Для стабилизации более низких напряжений применяются подобные же схемы, но отличающиеся от описанных наличием некоторых дополнительных элементов. Одна из таких схем показана на фиг. 42. Эта схема имеет вспомогательный однополупериодный выпрямитель с кенотроном $Л_7$, который питает источник опорного напряжения, состоящий из каскадной схемы стабилизации (см. фиг. 33) с газовыми стабилизаторами $Л_3$, $Л_4$, $Л_5$ и $Л_6$. Схема фиг. 42 позволяет получать стабилизованные напряжения от 3—5 до 150 *в* при токе около 30 *ма*. Изменение выходного напряжения производится регулировкой смеще-

ния на сетке усилительной лампы $Л_2$ с помощью потенциометра 0,3 *мгом*. В качестве усилительной лампы использована правая половина двойного триода 6Н9С. Левая половина лампы может быть использована для других схем, не связанных со схемой стабилизатора. Данные деталей указаны на схеме.

Получение низких стабилизованных напряжений от обычных схем стабилизаторов (например, от схем фиг. 37 или фиг. 40) невозможно, так как выходное стабилизованное



Фиг. 42. Схема электронного стабилизатора с низким выходным напряжением.

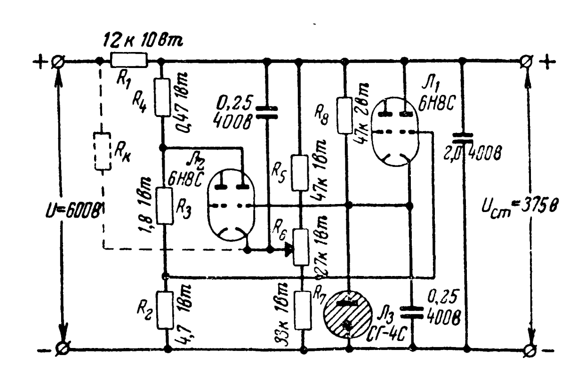
напряжение $U_{ст}$ обязательно должно быть больше опорного напряжения $U_{оп}$, чтобы обеспечить горение газовых стабилизаторов и создать необходимое анодное напряжение для усилительной лампы в схеме фиг. 37.

В схеме фиг. 42 питание источника опорного напряжения от отдельного выпрямителя дает возможность получать любые стабилизованные напряжения независимо от величины опорного напряжения. Анодное напряжение усилительной лампы в схеме фиг. 42 приблизительно равно сумме выходного стабилизованного напряжения и напряжения горения газового стабилизатора $Л_4$. Таким образом, нормальная работа усилительной лампы $Л_2$ в этой схеме обеспечивается тем, что ее анодное напряжение никогда не будет меньше напряжения горения газового стабилизатора $Л_4$.

Все рассмотренные выше схемы электронных стабилизаторов отличаются тем, что регулирующая лампа включена последовательно с нагрузкой. Поэтому эти схемы носят название схем стабилизаторов с последовательно включен-

ной регулирующей лампой. Существуют схемы, в которых регулирующая лампа включается параллельно нагрузке и которые называются стабилизаторами с параллельно включенной регулирующей лампой. Эти схемы применяются реже, чем схемы с последовательно включенной регулирующей лампой, и обычно используются при небольших токах нагрузки.

Одна из таких схем показана на фиг. 43. Лампа $Л_1$ является регулирующей, лампа $Л_2$ усилительной, а газовый



Фиг. 43. Схема электронного стабилизатора напряжения с параллельно включенной регулирующей лампой.

стабилизатор $Л_3$ источником опорного напряжения. Последовательно в цепь нагрузки включено сопротивление R_1. В схеме имеются два делителя напряжения: $R_2R_3R_4$ и $R_5R_6R_7$. Сопротивление R_8 служит для ограничения тока через газовый стабилизатор $Л_3$.

При увеличении входного напряжения U или при уменьшении тока нагрузки возрастает падение напряжения на сопротивлениях R_6, R_7, вследствие чего увеличивается отрицательное смещение на сетке усилительной лампы $Л_2$. Уменьшение анодного тока лампы $Л_2$, протекающего через сопротивление R_4, вызывает возрастание падения напряжения на сопротивлении R_2. При этом уменьшается отрицательный потенциал на сетке регулирующей лампы $Л_1$ и ее анодный ток увеличивается. Возросший анодный ток лампы $Л_1$, проходя по сопротивлению R_1, увеличивает падение напряжения на нем на величину, которая почти полностью компенсирует повышение входного напряжения U. В ре-

зультате напряжение на выходе стабилизатора $U_{ст}$ останется почти без изменения. Аналогично реагирует схема на уменьшение входного напряжения или на увеличение тока нагрузки.

В схеме фиг. 43 катоды усилительной и регулирующей ламп находятся почти под равными потенциалами. Это позволяет использовать для ламп $Л_1$ и $Л_2$ двойной триод и свести общее число ламп в схеме к двум. В случае необходимости заземлить положительный полюс напряжения сопротивление R_1 можно перенести в цепь «минуса».

Существенным недостатком схемы фиг. 43 является то, что меняющийся ток регулирующей лампы $Л_1$ проходит через газовый стабилизатор $Л_3$. Напряжение газового стабилизатора при этом немного меняется, что ухудшает стабильность выходного напряжения. Улучшить стабильность выходного напряжения можно, включив компенсационное сопротивление $R_к$, показанное на схеме пунктиром. Величина этого сопротивления уточняется при наладке схемы и составляет обычно 1—5 *мгом.*

На схеме фиг. 43 указаны данные деталей стабилизатора с выходным напряжением 375 *в* при токе 4—5 *ма.*

Сборка и монтаж схем электронных стабилизаторов напряжения напоминают сборку и монтаж усилителей низкой частоты. Все провода, а в особенности провод от сетки лампы первого каскада усилителя к делителю напряжения, должны быть по возможности короче.

При параллельном включении двух и более регулирующих ламп в цепь анода каждой из них (и в цепь экранной сетки тетродов и пентодов) следует включать антипаразитные сопротивления величиной 50—100 *ом.* Греющиеся детали (регулирующие лампы, шунтирующие сопротивления) следует располагать как можно дальше от конденсаторов.

Если стабилизатор правильно рассчитан и аккуратно собран, то налаживание его не представляет особого труда. Для настройки стабилизатора нужно на выход его включить вольтметр и, медленно поворачивая ручку потенциометра делителя напряжения (например, R_1, R_2 на фиг. 37 и 40), установить по вольтметру нужное напряжение. Если, наблюдая некоторое время за стрелкой вольтметра, можно заметить, что она стоит неподвижно, то это свидетельствует о нормальной работе стабилизатора.

Напряжение сети U_1, *в*	Напряжение сети U_1, %	Ток нагрузки $I_н$, *ма*	Общий ток стабилизатора *I*, *ма*	Напряжение на выходе стабилизатора $U_{ст}$, *в*	Напряжение на входе стабилизатора *U*, *в*	Напряжение на аноде регулирующей лампы U_{a_1}, *в*	Ток через шунтирующее сопротивление $I_ш$, *ма**
1	2	3	4	5	6	7	8
102	85	60	70	300	420	120	20
120	100	60	70	300	495	195	33
126	105	60	70	300	520	220	37

* При $R_ш$ = 6 *ком*.

В случае, если напряжение на выходе не равно расчетному или колеблется, следует в первую очередь проверить величину входного напряжения стабилизатора и величину падения напряжения на регулирующей лампе. Эти напряжения должны полностью соответствовать расчетным значениям. Далее, надо убедиться, что газовый стабилизатор зажегся. Наконец, надо попробовать увеличить емкость конденсатора C_1 на выходе стабилизатора на 2—3 *мкф*. Никогда не следует включать электронный стабилизатор без нагрузки, так как это может привести к выходу из строя газового стабилизатора или ограничивающего сопротивления. Перечисленными причинами чаще всего объясняются неисправности в электронных стабилизаторах напряжения.

Пример 10. Приведем пример полного расчета электронного стабилизатора напряжения, удовлетворяющего следующим требованиям:

1) стабилизованное напряжение $U_{ст} = +300$ *в*;

2) ток нагрузки $I_н = 60$ *ма*;

3) номинальное значение напряжения питающей сети $U_1 = 120$ *в*;

4) изменение напряжения питающей сети происходит в пределах от —15 до +5% от номинального значения, т. е. от 102 до 126 *в*;

5) частота питающей сети $f = 50$ *гц*.

Выбор схемы стабилизатора. В данном случае выбор схемы стабилизатора определяется заданным током нагрузки $I_н = 60$ *ма* и большими изменениями напряжения питающей сети (от +5 до —15%). Очевидно, что при этих условиях должна быть выбрана схема электронного стабилизатора напряжения. Так как особых требований к качеству стабилизации не предъявляется, то ограничимся схемой стабилизатора с одним каскадом усиления постоянного тока.

В качестве регулирующей лампы выбираем тетрод 6П3С в триодном соединении. Можно заранее сказать, что мощность рассеяния на

Таблица 5

стабилизатора напряжения

Ток через регулирующую лампу I_{a_1}, *ма*	Мощность рассеяния на аноде регулирующей лампы P_{a_1}, *вт*	Мощность, выделяемая на шунтирующем сопротивлении $P_{ш}$, *вт*	Смещение на сетке регулирующей лампы U_{c_1}, *в*	Ток через усилительную лампу I_{a_2}, *мка***	Анодное напряжение на усилительной лампе U_{a_2}, *в*	Смещение на сетке усилительной лампы U_{c_2}, *в*
9	10	11	12	13	14	15
50	6	2,4	—3	10	147	—3,5
37	7,2	6,45	—15	50	135	—2,9
33	7,25	8,15	—19	63	131	—2,7

** При $R_{a_2} = 0{,}3$ *мгом*.

аноде регулирующей лампы 6П3С превысит допустимую. Падение напряжения на лампе может доходить до 200 *в*; при токе 60 *ма* это составляет 12 вместо 10 *вт*, допустимых в триодном режиме. Поэтому ставим параллельно регулирующей лампе, разгружающее ее шунтирующее сопротивление $R_ш$.

В качестве усилительной лампы используем триодную часть двойного диод-триода 6Г7, имеющего большой коэффициент усиления ($\mu = 70$).

В качестве источника опорного напряжения $U_{оп}$ выбираем газовый стабилизатор СГ-4С, имеющий наивысшее напряжение горения (150 *в*) среди других газовых стабилизаторов. Остаток напряжения ($U_{ст} - U_{оп} = 150$ *в*) вполне достаточен для нормальной работы усилительной лампы 6Г7.

Выбранная схема с выпрямителем показана на фиг. 44. Данные деталей, указанные на схеме, получены в результате дальнейшего расчета.

Расчет режима схемы стабилизатора. Расчет удобно свести в табл. 5. Пояснения к заполнению каждой графы расчетной таблицы приводятся в нижеследующих пунктах (номер пункта соответствует номеру графы табл. 5).

1. В графе 1 указаны заданные значения напряжения питающей сети U_1 (минимальное, номинальное и максимальное).

2. В графе 2 указаны значения напряжения сети в процентах от номинального (120 *в*).

3. В графе 3 указано заданное значение тока нагрузки $I_н$.

4. В графе 4 указан общий ток I, отбираемый от стабилизатора с учетом тока $I_{оп}$, потребляемого газовым стабилизатором СГ-4С.

Так как газовый стабилизатор питается от стабилизованного напряжения, то ток $I_{оп}$ при работе практически не изменяется и может быть выбран небольшим.

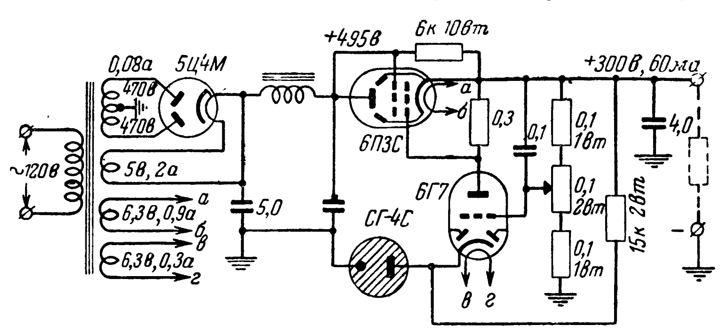
В данном случае $I_{оп} = 10$ *ма*, а поэтому

$$I = I_н + I_{оп} = 60 + 10 = 70 \text{ ма}.$$

Током через делитель напряжения и через лампу 6Г7 можно пренебречь.

5. В графе 5 указано заданное стабилизованное напряжение $U_{ст}$.

6. Для того чтобы определить необходимое напряжение U на входе стабилизатора (графа 6), нужно предварительно задаться минимальным падением напряжения на регулирующей лампе. Очевидно, что минимальное напряжение на регулирующей лампе будет при минимальном напряжении питающей сети (строка 1, графы 1 и 2). Для



Фиг. 44. Схема электронного стабилизатора напряжения (к примеру 10).

лампы 6П3С минимальное падение напряжения обычно выбирают в пределах от 120 до 150 *в*. Задаваясь минимальным падением на лампе 120 *в* (графа 7), находим минимальное входное напряжение

$$U_{мин} = U_{ст} + U_{a_1\,мин} = 300 + 120 = 420 \text{ в},$$

соответствующее минимальному напряжению сети (85% от номинала, графа 2).

Полагая, что изменения входного напряжения U пропорциональны изменению напряжения сети U_1, находим величину номинального и максимального входного напряжения:

$$U_{ном} = \frac{U_{мин}}{0,85} = \frac{420}{0,85} = 495 \text{ в};$$

$$U_{макс} = U_{ном} \cdot 1,05 = 495 \cdot 1,05 = 520 \text{ в}.$$

7. В графе 7 указано падение напряжения U_{a_1} на регулирующей лампе, определяемое как разность между напряжениями на входе и на выходе стабилизатора:

$$U_{a_1} = U - U_{ст}.$$

8. При определении тока $I_ш$ через шунтирующее сопротивление (графа 8) надо иметь в виду следующее. Как видно из схемы фиг. 44, общий ток стабилизатора складывается из суммы токов через регулирующую лампу и через шунтирующее сопротивление. При мини-

мальном напряжении на аноде регулирующей лампы ток через шунтирующее сопротивление будет также минимальным, а ток через регулирующую лампу будет, следовательно, максимальным Так как максимальный ток через регулирующую лампу протекает при минимальном анодном напряжении, то очевидно, что отрицательное смещение на ее сетке будет при этих условиях минимальным. Величиной этого минимального смещения на сетке регулирующей лампы нужно задаться заранее.

Из семейства анодных характеристик лампы 6П3С (см. фиг. 38) выбираем минимальное смещение $U_{c_1} = -3$ *в* при минимальном анодном напряжении $U_{a_1} = 120$ *в* (строка 1, графа 12) и находим соответствующий анодный ток $I_{a_1\,макс} = 50$ *ма*.

Как указывалось, ток через шунт будет при этом минимальным. Он равен разности между общим током стабилизатора и током через регулирующую лампу:

$$I_{ш.\,мин} = I - I_{a_1\cdot макс} = 70 - 50 = 20 \text{ ма}.$$

Сопротивление шунта

$$R_ш = \frac{U_{a_1\,мин}}{I_{ш.\,мин}} = \frac{120}{20\cdot 10^{-3}} = 6\,000 \text{ ом}.$$

Зная U_{a_1} и $R_ш$, легко найти другие значения тока через шунт по формуле

$$I_ш = \frac{U_{a_1}}{R_ш}.$$

9. В графе 9 указан ток I_{a_1} через регулирующую лампу, определяемый как разность между общим током стабилизатора и током через шунт:

$$I_{a_1} = I - I_ш.$$

Желательно, чтобы минимальный ток через регулирующую лампу (строка 3) был больше, чем 5—7 *ма*. В данном примере это условие легко выполняется.

10. В графе 10 указана мощность P_{a_1}, рассеиваемая на аноде регулирующей лампы и определяемая как произведение анодного напряжения лампы на ее анодный ток:

$$P_{a_1} = U_{a_1} I_{a_1}.$$

Для лампы 6П3С в триодном режиме допустимая мощность рассеяния не должна превышать 10 *вт*. Если P_{a_1} превышает допустимую величину, то следует уменьшить шунтирующее сопротивление $R_ш$ или включить несколько регулирующих ламп параллельно.

11. Для выбора типа шунтирующего сопротивления $R_ш$ необходимо знать мощность, выделяемую на нем при работе схемы стабилизатора (графа 11):

$$P_ш = U_{a_1} I_ш.$$

Сопротивление $R_ш$ должно быть рассчитано на максимальную мощность, которая будет выделяться на нем (в нашем примере около 8 *вт*).

12. Смещение на сетке регулирующей лампы U_{c_1} (графа 12) находят из семейства анодных характеристик (см. фиг. 38) по известным значениям анодного напряжения U_{a_1} и анодного тока I_{a_1} (графы 7 и 9).

13. Для нахождения анодного тока I_{a_2} усилительной лампы 6Г7 (графа 13) следует предварительно выбрать величину сопротивления анодной нагрузки R_{a_2} в соответствии с величиной внутреннего сопротивления лампы ($R_{i_2} = 0{,}15$ *мгом*).

Выбираем $R_{a_2} = 2R_{i_2} = 2 \cdot 0{,}15 = 0{,}3$ *мгом*.

Тогда анодный ток (см. пример 8 на стр. 68)

$$I_{a_2} = \frac{|U_{c_1}|}{R_{a_2}},$$

где $|U_{c_1}|$ означает абсолютную величину смещения на сетке регулирующей лампы (без учета знака).

Минимальный анодный ток (строка 1) составляет 10 *мка*, что является крайним допустимым пределом, ниже которого спускаться нежелательно.

14. Анодное напряжение U_{a_2} усилительной лампы (графа 14) определяется как разность между выходным напряжением и суммой напряжения на сетке регулирующей лампы и опорного напряжения:

$$U_{a_2} = U_{cm} - (|U_{c_1}| + U_{on}).$$

15. В графе 15 указано смещение U_{c_2} на сетке усилительной лампы 6Г7, которое находят из семейства анодных характеристик (фиг. 45) по известным уже значениям анодного тока I_{a_2} и анодного напряжения U_{a_2} (графы 13 и 14). Зная разность между крайними значениями смещения на сетке лампы усилителя (ΔU_{c_2}), можно найти величину полного изменения напряжения на выходе стабилизатора (ΔU_{cm}) при изменении напряжения сети от минимума до максимума

$$\Delta U_{cm} = \Delta U_{c_2} \frac{U_{cm}}{U_{on}} = (3{,}5 - 2{,}7)\,\frac{300}{150} = 1{,}6 \text{ в},$$

которая в данном случае составляет около 0,5% от номинального выходного напряжения 300 *в*.

Необходимая величина смещения на сетке усилительной лампы электронного стабилизатора напряжения устанавливается автоматически при установке выходного напряжения потенциометром делителя. При этом, конечно, предполагается, что расчет схемы был произведен правильно и данные установленных деталей соответствуют расчетным.

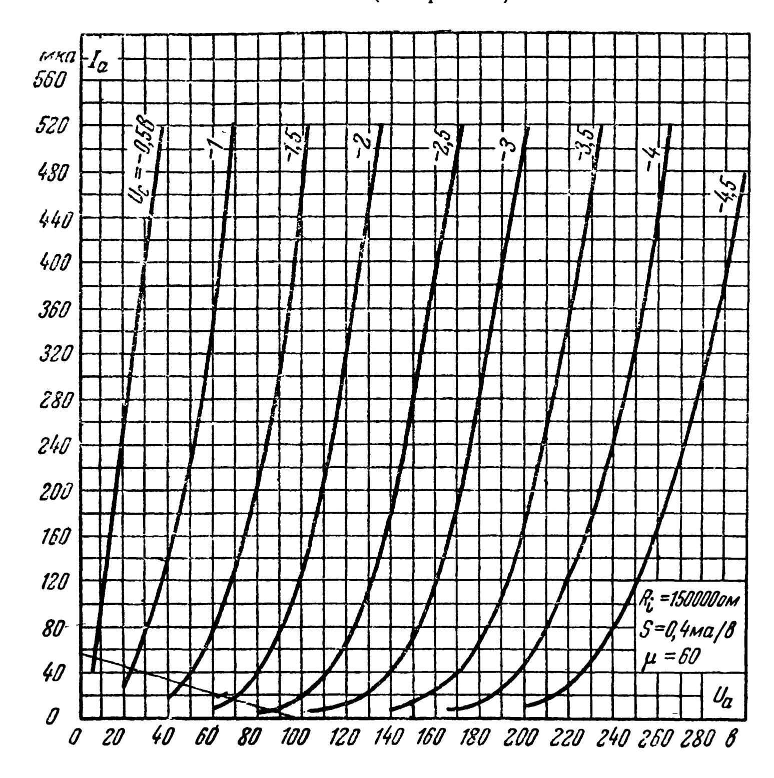
Найдем величину сопротивления делителя, полагая, что ток через него равен 1 *ма*. Тогда

$$R_1 + R_2 = \frac{U_{cm}}{1 \cdot 10^{-3}} = \frac{300}{1 \cdot 10^{-3}} = 300\,000 \text{ ом}.$$

Сопротивление нижнего плеча R_2 определим по формуле (11):

$$R_2 = \frac{U_{on}}{U_{cm}}(R_1 + R_2) = \frac{150}{300} \cdot 300\,000 = 150\,000 \text{ ом}.$$

Для обеспечения более плавной установки выходного напряжения делитель составляем из двух постоянных и одного переменного сопротивления, по 100 000 *ом* каждое (см. фиг. 44).



Фиг. 45. Анодные характеристики триодной части лампы 6Г7.

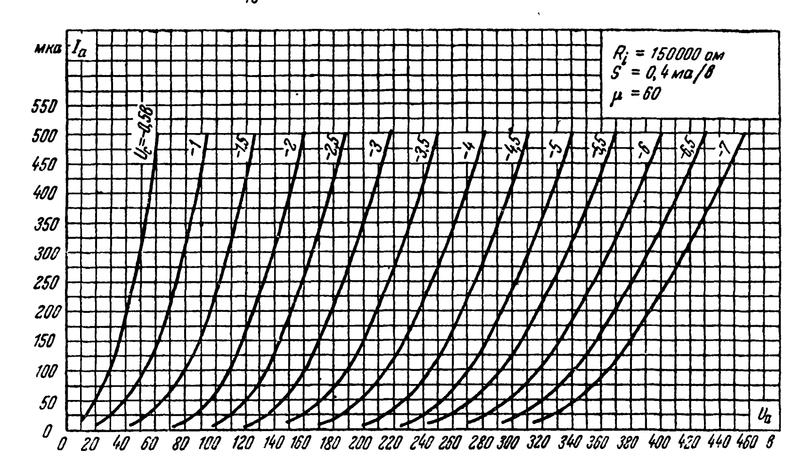
Ограничивающее сопротивление в цепи газового стабилизатора рассчитывается по формуле (10):

$$R_3 = \frac{U_{cm} - U_{on}}{I_{on}} = \frac{300 - 150}{10 \cdot 10^{-3}} = 15\,000 \text{ ом}.$$

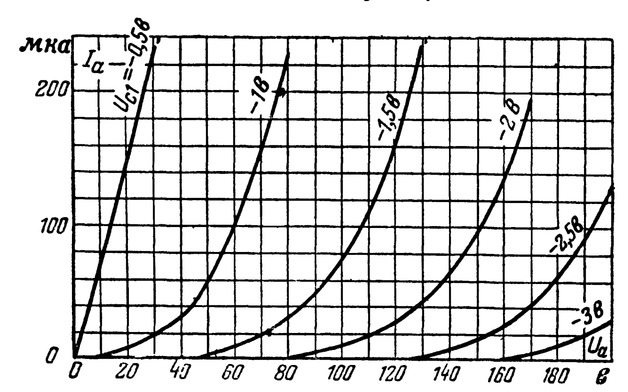
На этом заканчивается расчет стабилизатора по схеме фиг. 44.

Рассчитанный стабилизатор должен работать при заданных колебаниях напряжения сети $(-15 \div +5\%)$. Уменьшение напряжения

сети более чем на 15% от номинала может привести к появлению на сетке регулирующей лампы положительного потенциала, а следовательно, к возникновению сеточного тока. Увеличение напряжения сети более чем на 5% от номинала может создать положительный



Фиг. 46. Анодные характеристики двойного триода 6Н9С (для одного триода).



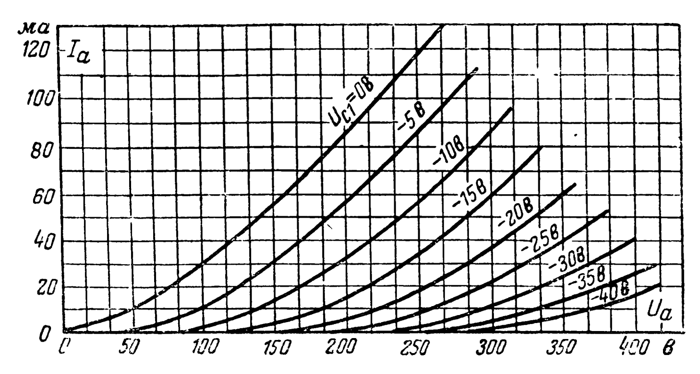
Фиг. 47. Анодные характеристики двойного триода 6Н2П (для одного триода).

потенциал на сетке усилительной лампы и также вызвать сеточный ток. Обе эти причины ведут к полному нарушению работы электронного стабилизатора, лампы которого должны работать только при отсутствии сеточных токов.

Расчет электронного стабилизатора без шунтирующего сопротивления $R_ш$ производится тем же способом. В расчетной таблице (табл. 5)

будут при этом отсутствовать графы 8 и 11. Задаваясь минимальным анодным напряжением на регулирующей лампе, надо иметь в виду, что при заданном токе через лампу отрицательное смещение на ее сетке должно быть не менее 1—3 *в*.

Расчет режима регулирующей лампы в стабилизаторе с двумя каскадами усиления (фиг. 40) ничем не отличается от выше приве-



Фиг. 48. Анодные характеристики тетрода 6П6С (или 6П1П) при триодном включении (экранная сетка соединена с анодом).

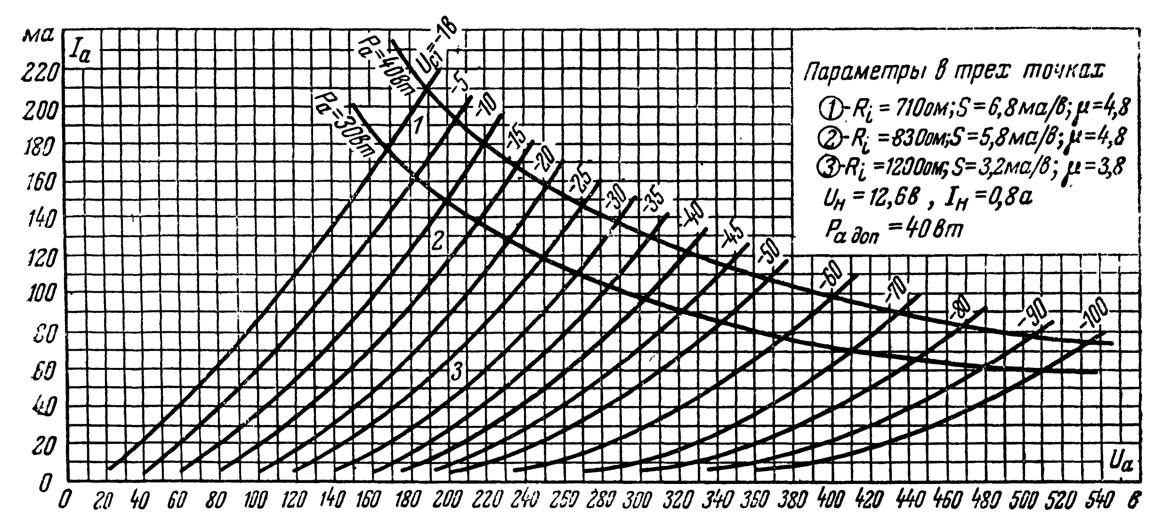
денного расчета. Режим усилительных ламп рассчитывается с помощью формул (14), (15), (16) и (17). Остальные элементы схемы фиг. 40 также могут быть рассчитаны без затруднений.

На фиг. 46, 47, 48 и 49 приведены анодные характеристики усилительных ламп 6Н9С и 6Н2П и регулирующих ламп 6П6С и ГУ-50, которые могут понадобиться при расчетах электронных стабилизаторов.

ЭЛЕКТРОННЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Для питания анодов телевизионных электронно-лучевых трубок применяются сравнительно высокие напряжения: до 16 *кв* для трубок прямого видения и до 25—30 *кв* для проекционных трубок. Ток электронного луча трубки обычно составляет несколько десятков или сотен микроампер. Таким образом, выпрямленная мощность, необходимая для питания анодов трубок, не превышает 10—20 *вт*.

Как уже было отмечено ранее, колебания анодного напряжения электронно-лучевых трубок вызывают изменения размеров изображения, а также нарушают его фокусировку. В свою очередь, величина колебаний анодного напряжения трубки пропорциональна колебаниям напряжения питающей сети, а также зависит от диапазона изменений



Фиг. 49. Анодные характеристики пентода ГУ-50 при триодном включении (экранная и защитная сетки соединены с анодом).

тока электронного луча. Известно, что наибольшие изменения тока луча трубки происходят при переходе от черного пятна изображения к белому. При этом ток в обычных трубках прямого видения может изменяться на 80—160 *мка*. Увеличение тока нагрузки вызывает уменьшение выпрямленного напряжения, и наоборот. Так как среднее значение тока трубки обычно находится в пределах 60—120 *мка*, то естественно, что указанные колебания тока ($\pm$40 ÷ 80 *мка*) при обычных выпрямителях, обладающих высоким внутренним сопротивлением, вызывают заметные изменения выпрямленного напряжения. Следует отметить, что колебания тока в проекционных трубках значительно превышают приведенные цифры.

В трубках с магнитным отклонением луча ширина и высота изображения обратно пропорциональны корню квадратному из анодного напряжения трубки (при постоянном значении тока в отклоняющей катушке). Это означает, что увеличение анодного напряжения, например, на 10% вызовет уменьшение линейных размеров изображения на 5%.

В трубках с электростатическим отклонением электронного луча размеры изображения обратно пропорциональны первой степени анодного напряжения. С этой точки зрения трубки с электростатической отклоняющей системой требуют более стабильного анодного напряжения, так как изменение его на 10% вызывает изменение линейных размеров изображения также на 10%.

Влияние изменений анодного напряжения на фокусировку изображения учесть значительно труднее. Было, например, отмечено, что изображение, сфокусированное при яркости, соответствующей току 120 *мка* и напряжению 4,35 *кв*, заметно дефокусировалось при меньшей яркости, соответствующей току 45 *мка* и напряжению, возросшему до 4,8 *кв*.

В связи с тем, что в современных высококачественных телевизионных устройствах все чаще начинают применять стабилизацию высокого напряжения, рассмотрим некоторые методы получения стабилизованного анодного напряжения для питания электронно-лучевых трубок. Вопросы стабилизации высокого напряжения чрезвычайно тесно связаны с методами получения высокого напряжения. Поэтому необходимо особо рассмотреть эти методы. Незначительная выпрямленная мощность, потребляемая в цепи анода электронно-лучевой трубки, позволяет применять для ее питания не совсем обычные схемы высоковольтных выпрямителей.

В настоящее время в качестве источников высокого напряжения для питания электронно-лучевых трубок применяются следующие устройства:

1) выпрямитель с удвоением или умножением напряжения, питаемый от сети переменного тока с частотой 50 *гц*;

2) выпрямитель, работающий от импульсов обратного хода строчной развертки телевизионного приемника;

3) выпрямитель, использующий высокочастотные колебания специального генератора с ударным возбуждением;

4) выпрямитель, использующий высокочастотные незатухающие колебания специального генератора с самовозбуждением.

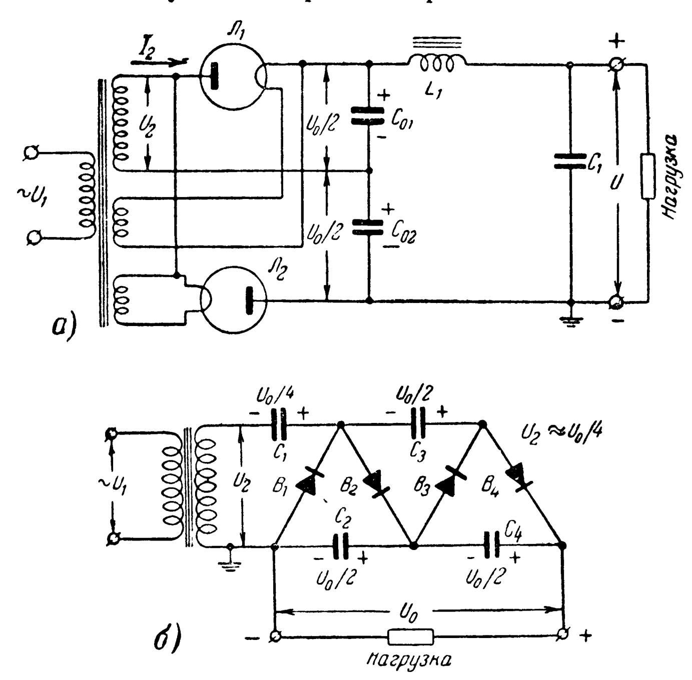
В выпрямителях первого типа обычно используются схемы, приведенные на фиг. 50.

Схему удвоения (фиг. 50, *а*) можно представить как две однополупериодные схемы, соединенные последовательно. Каждая однополупериодная схема создает на своей входной емкости C_0 напряжение $\frac{U_0}{2}$. Когда верхний конец вторичной обмотки трансформатора становится положительным по отношению к нижнему концу, то заряжается конденсатор C_{01}; когда же положительным становится нижний конец обмотки, то заряжается конденсатор C_{02}. Конденсаторы C_{01} и C_{02} соединены между собой так, что их напряжения складываются и на нагрузке получается удвоенное выпрямленное напряжение по сравнению с однополупериодной схемой.

В схеме удвоения фиг. 50,*а* используются оба полупериода переменного напряжения, вследствие чего частота пульсации равна удвоенной частоте сети. В этой схеме применяются как кенотроны, так и селеновые или купроксные выпрямители. При использовании кенотронов следует иметь в виду, что для питания накалов необходимо иметь две отдельные изолированные обмотки.

Если выпрямленное напряжение, полученное с помощью схемы удвоения, недостаточно, а увеличить переменное напряжение вторичной обмотки трансформатора по тем или иным причинам нельзя, то можно воспользоваться схемами умножения напряжения, которые дают возможность получить удвоенное, утроенное, учетверенное и т. д. напряжение по сравнению с однополупериодной схемой. В схемах умножения чаще всего применяются селеновые или купроксные выпрямители.

На фиг. 50,*б* приведена схема учетверения напряжения, в которой имеется четыре выпрямителя (например, селеновых) и четыре конденсатора. Работу схемы можно объяснить следующим образом. Предположим, что в дан-



Фиг. 50. Схемы удвоения и учетверения напряжения.

ный момент нижний конец вторичной обмотки трансформатора имеет положительный потенциал по отношению к верхнему концу. Тогда конденсатор C_1 зарядится через выпрямитель B_1 до напряжения $\frac{U_0}{4}$. В следующий полупериод конденсатор C_2 под воздействием суммы напряжений на вторичной обмотке (U_2) и на емкости C_1 $\left(\frac{U_0}{4}\right)$ зарядится через выпрямитель B_2 до напряжения $\frac{U_0}{2}$. Еще через один полупериод конденсатор C_3 зарядится через выпрямитель B_3 до напряжения $\frac{U_0}{2}$, которое

представляет собой алгебраическую сумму напряжений на вторичной обмотке (U_2), на емкости C_2 $\left(\frac{U_0}{2}\right)$ и на емкости C_1 $\left(\frac{U_0}{4}\right)$. В данном случае напряжение на емкости C_1 направлено противоположно напряжениям на вторичной обмотке и на емкости C_2. За четвертый полупериод переменного напряжения конденсатор C_4 зарядится через выпрямитель B_4 также до напряжения $\frac{U_0}{2}$. При этом напряжение на емкости C_2 будет направлено противоположно сумме напряжений на вторичной обмотке и на емкостях C_1 и C_3. Напряжение на нагрузке представляет собой сумму напряжений на конденсаторах C_2 и C_4.

Нетрудно видеть, что путем добавления или исключения одного или нескольких каскадов умножения (каждый каскад состоит из выпрямителя и конденсатора) можно изменять кратность умножения напряжения. Например, для утроения напряжения следует оставить в схеме фиг. 50,*б* три выпрямителя и три конденсатора, а для ушестерения напряжения следует добавить два выпрямителя и два конденсатора.

В схемах умножения частота пульсации выпрямленного напряжения равна частоте питающей сети.

В качестве вторичной обмотки трансформатора для схемы умножения напряжения можно использовать половину вторичной обмотки имеющегося силового трансформатора с заземленной средней точкой.

В случае применения в схемах умножения кенотронов накал каждого из них следует питать от отдельной обмотки. Обмотки накала должны быть надежно изолированы друг от друга, от первичной обмотки и от сердечника трансформатора.

Следует еще раз подчеркнуть, что схемы умножения напряжения применяются при малых выпрямленных токах.

Ниже приводятся некоторые приближенные формулы для расчета выпрямителей с умножением напряжения (фиг. 50,*б*).

Напряжение вторичной обмотки трансформатора U_2 можно определить из формулы

$$U_2 = \frac{0,85U_0}{K}, \qquad (20)$$

где U_0 — полное выпрямленное напряжение, *в*;
K — число каскадов умножения (в схеме фиг. 50,*б* $K = 4$).

При выборе кенотрона или селенового выпрямителя для схемы умножения следует иметь в виду, что обратное напряжение на любом каскаде равно $2{,}8U_2$.

Емкость конденсатора каждого каскада должна быть не меньше величины, определяемой из формулы

$$C = \frac{I_0}{fU_0} 2K(K+2)\ 10^6, \qquad (21)$$

где I_0 — выпрямленный ток, *а*;
U_0 — выпрямленное напряжение, *в*;
f — частота сети, *гц*;
C — емкость, *мкф*.

Если выбранная емкость соответствует расчетной величине, то амплитуда пульсации на выходе выпрямителя будет составлять около 6% от выпрямленного напряжения.

Рабочее напряжение на каждом конденсаторе (кроме первого) равно $2\frac{U_0}{K}$; на первом конденсаторе (C_1 на фиг. 50,*б*) рабочее напряжение равно $\frac{U_0}{K}$.

Пример 11. Рассчитать схему учетверения напряжения на селеновых выпрямителях (фиг. 50,*б*) по следующим данным: $U_0 = 4\,000$ *в*; $I_0 = 1$ *ма*; частота сети $f = 50$ *гц*; $K = 4$.

1. Напряжение вторичной обмотки трансформатора по формуле (20)

$$U_2 = \frac{0{,}85U_0}{K} = \frac{0{,}85 \cdot 4\,000}{4} = 850 \text{ в}.$$

2. Выбираем селеновые диски диаметром 5 *мм*, так как $I_0 = 1$ *ма*, а допустимый ток для таких дисков составляет 1,2 *ма*.

3. Обратное напряжение на одном каскаде умножения

$$U_{обр} = 2{,}8U_2 = 2{,}8 \cdot 850 = 2\,400 \text{ в}.$$

4. Число дисков в одном каскаде умножения

$$N = \frac{U_{обр}}{25} = \frac{2\,400}{25} \approx 100 \text{ дисков}.$$

5. Емкость конденсатора каскада по формуле (21)

$$C = \frac{I_0}{fU_0} 2K(K+2) \cdot 10^6 = \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 4\,(4+2)}{50 \cdot 4\,000} \cdot 10^6 \approx 0{,}25 \text{ мкф}.$$

6. Рабочее напряжение конденсаторов C_2, C_3, C_4

$$\frac{2U_0}{K} = \frac{2 \cdot 4\,000}{4} = 2\,000 \text{ в.}$$

7. Рабочее напряжение конденсатора C_1

$$\frac{U_0}{K} = \frac{4\,000}{4} = 1\,000 \text{ в.}$$

Основными достоинствами выпрямителей первого типа являются простота схемы и минимальное количество необходимых деталей. Однако с повышением выпрямленного напряжения габариты анодного трансформатора сильно возрастают: он становится громоздким и тяжелым.

Из-за низкой частоты выпрямляемого переменного напряжения (50 *гц*) емкость конденсаторов фильтров выпрямителей должна иметь сравнительно большую величину, что приводит к увеличению габаритов выпрямителя в целом.

Выпрямители, непосредственно работающие от сети переменного тока с частотой 50 *гц*, обычно обладают большим запасом по мощности и поэтому могут непродолжительное время отдавать в нагрузку ток значительно больше расчетного (при длительной перегрузке могут выйти из строя трансформатор, кенотроны или селеновые выпрямители). Это нежелательно, так как при неосторожном обращении такой высоковольтный выпрямитель представляет опасность для жизни: при случайном прикосновении к полюсам выпрямителя через тело может пройти ток, способный привести к смертельному исходу.

Существенным недостатком выпрямителей описываемого типа является трудность стабилизации высокого выпрямленного напряжения. Применение схем электронной стабилизации (см. фиг. 37) затрудняется тремя основными причинами.

Первая причина — необходимость расхода сравнительно большого тока (8—12 *ма*) на поддержание горения газового стабилизатора, обеспечивающего опорное напряжение. Так как ток основной нагрузки (трубки) составляет не более 1 *ма*, то очевидно, что габариты такого выпрямителя с электронной стабилизацией непомерно возрастут, а его к. п. д. будет чрезвычайно малым.

Вторая причина — трудность подыскания подходящего триода для работы в качестве регулирующей лампы. Для

высоковольтного стабилизованного выпрямителя регулирующая лампа должна быть рассчитана на малый ток и на очень большое напряжение между анодом и катодом (до 2—3 *кв*). Лампы же, предназначенные для высоких напряжений, обычно рассчитаны на большие токи и поэтому будут очень плохо использованы в схемах электронных стабилизаторов.

Третья причина — очень большое напряжение на аноде усилительной лампы стабилизатора по схеме фиг. 37. Это напряжение почти равно выходному высокому напряжению и не может быть приложено к обычным усилительным лампам.

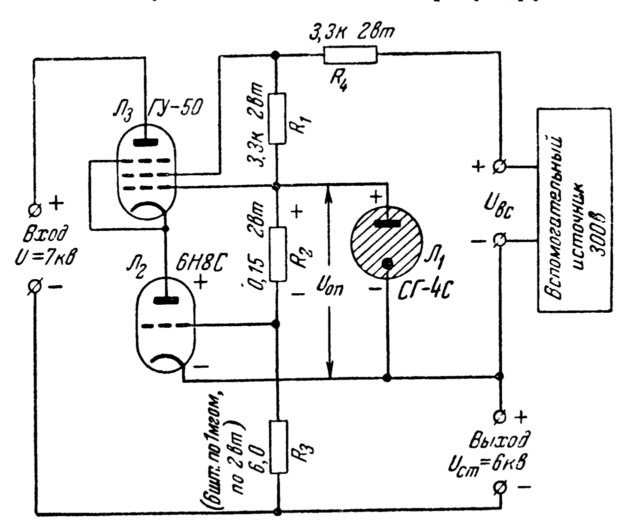
В силу перечисленных причин маломощные выпрямители с удвоением или умножением напряжения, работающие от обычной сети переменного тока, очень редко используются с электронными стабилизаторами напряжения обычного типа. Все сказанное не исключает, конечно, возможности применения электромагнитных стабилизаторов напряжения со стороны питающей сети.

Если с плохим использованием регулирующей лампы можно примириться, то для стабилизации высокого напряжения применяется специальная схема электронного стабилизатора, приведенная на фиг. 51. Эта схема предназначена для стабилизации напряжения до 5—6 *кв* при токах до 5—8 *ма* и требует отдельного вспомогательного источника напряжения для питания газового стабилизатора $Л_1$.

Рассмотрим принцип действия такого стабилизатора. При увеличении входного напряжения или уменьшении тока нагрузки несколько повысится напряжение на выходе схемы, а следовательно, и напряжение на делителе $R_1R_2R_3$. Изменившаяся разность между напряжением на R_2 и опорным напряжением $U_{оп}$ вызовет увеличение отрицательного потенциала на сетке усилительной лампы $Л_2$; сопротивление лампы $Л_2$ возрастет и падение напряжения на ней увеличится. Разность между напряжением на усилительной лампе $Л_2$, включенной в цепь катода регулирующей лампы $Л_3$, и тем же опорным напряжением $U_{оп}$ изменится и создаст дополнительное отрицательное смещение на сетке регулирующей лампы $Л_3$. Это в свою очередь вызовет увеличение сопротивления лампы $Л_3$, а следовательно, и увеличение падения напряжения на ней. Выходное напряжение при этом снизится и станет почти равным первоначальной величине, которая была до повышения напряжения.

Точно так же в случае уменьшения входного напряжения или увеличения тока нагрузки напряжение на выходе почти не понизится, так как в результате действия схемы стабилизатора уменьшится падение напряжения на регулирующей лампе $Л_3$.

Интересно отметить, что в данной схеме газовый стабилизатор $Л_1$ служит источником опорного напряжения одновременно и для усилительной и для регулирующей ламп.



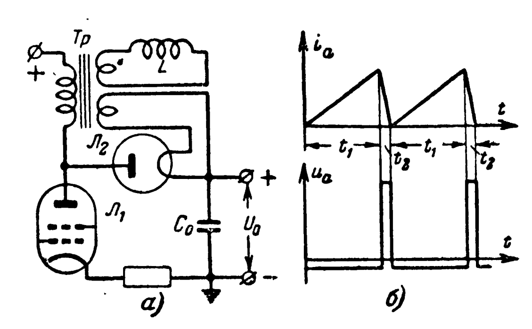
Фиг. 51. Схема стабилизатора высокого напряжения с вспомогательным источником питания.

В качестве усилительной лампы $Л_2$ можно применить любой триод с достаточно большим коэффициентом усиления, рассчитанный на пропускание полного тока нагрузки. Напряжение на аноде $Л_2$ примерно равно опорному напряжению $U_{оп}$. Регулирующая лампа $Л_3$ должна выдерживать анодное напряжение до 1,5—2 *кв*. При расчете делителя $R_1R_2R_3$ следует иметь в виду, что падение напряжения на сопротивлении R_1 примерно равно напряжению U_{c_2} на экранной сетке лампы $Л_3$ (50—100 *в*); падение напряжения на сопротивлении R_2 — опорному напряжению $U_{оп}$, а падение напряжения на сопротивлении R_3 равно выходному напряжению. На сопротивлении R_4 должно падать напряжение, равное разности между вспо-

могательным напряжением $U_{вс}$ и суммой экранного и опорного напряжений:

$$U_{вс} - (U_{c_2} + U_{оп}).$$

Для того чтобы избежать опасности пробоя внутри ламп схемы фиг. 51, необходимо сначала включить накалы ламп $Л_2$ и $Л_3$ и вспомогательное напряжение, а затем подать на вход схемы высокое напряжение. Регулировку выходного напряжения можно производить, меняя потенциал сетки лампы $Л_2$ при помощи делителя (потенциометра), включенного между сопротивлениями R_2 и R_3. На схеме фиг. 51 указаны данные стабилизатора на 5—6 *кв* при токе 1—2 *ма*.



Фиг. 52. Схема импульсного высоковольтного выпрямителя.

Выпрямители второго типа, работающие от импульсов обратного хода строчной развертки, часто применяются в телевизионных приемниках. Простейшая схема такого выпрямителя приведена на фиг. 52,*а*.

Лампа $Л_1$ представляет собой генератор строчной развертки; *Тр* — строчный трансформатор; *L* — отклоняющая катушка. Ток в анодной цепи генераторной лампы имеет пилообразную форму (фиг. 52,*б*). Нарастание тока (прямой ход луча) происходит сравнительно медленно (за время t_1), а спадание тока (обратный ход луча) очень быстро (за время t_2).

Известно, что при изменении тока, протекающего через катушку индуктивности, на концах ее возникает э. д. с. Чем больше скорость изменения тока или, иначе говоря, чем меньше промежуток времени, за который происходит дан-

ное изменение тока, тем больше возникающая на концах катушки э. д. с. Изменение тока за малое время обратного хода (t_2) вызывает на первичной обмотке строчного трансформатора *Тр* импульс напряжения 5—7 *кв*. Очевидно, что уменьшение тока через лампу $Л_1$ за время t_2 вызывает возрастание напряжения U_a на ее аноде; поэтому возникший импульс имеет положительный полюс на конце катушки, соединенном с анодом генераторной лампы. Этот положительный импульс выпрямляется однополупериодной схемой с кенотроном $Л_2$ (например, типа 1Ц1С), который должен быть рассчитан на обратное напряжение, равное только выпрямленному напряжению, а не утроенному выпрямленному, как в обычной однополупериодной схеме. Пониженное обратное напряжение в этой схеме объясняется тем, что обратный по знаку импульс напряжения на катушке, возникающий за время прямого хода (t_1), имеет незначительную величину (фиг. 52,*б*) и обратное напряжение практически равно выпрямленному напряжению на конденсаторе C_0.

Повышенная частота выпрямляемых импульсов (10 000—15 000 *гц*) позволяет применить входной конденсатор C_0 малой емкости (1 000 *пф*). Применять вместо кенотрона $Л_2$ селеновый выпрямитель не рекомендуется, так как из-за его большой собственной емкости сильно снижается выпрямленное напряжение.

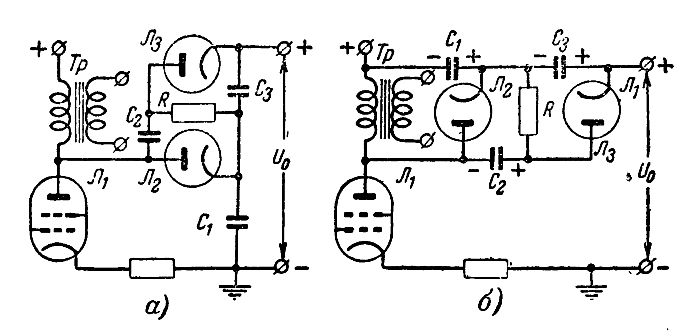
С помощью схемы фиг. 52,*а* можно получить выпрямленное напряжение до 8—12 *кв*.

В случае, если полученное выпрямленное напряжение недостаточно, его можно повысить с помощью специальной схемы удвоения напряжения, приведенной на фиг. 53,*а*. Эта схема предназначена для удвоения напряжения в схемах импульсных выпрямителей.

Принцип действия схемы фиг. 53,*а* легко понять, если ее изобразить так, как это показано на фиг. 53,*б*, где конденсатор C_1 присоединен не к «земле», а к «плюсу» источника анодного напряжения генераторной лампы $Л_1$. Схема фиг. 53,*б* полностью эквивалентна схеме фиг. 53,*а*, так как для импульсов напряжения обратного хода строчной развертки потенциалы корпуса («земли») и «плюса» источника анодного напряжения лампы $Л_1$ практически равны.

За время импульса обратного хода t_2 конденсатор C_1 заряжается через кенотрон $Л_2$ до амплитудного значе-

ния импульса напряжения $\left(\frac{U_0}{2}\right)$. За время прямого хода t_1 конденсатор C_2 заряжается от конденсатора C_1 через сопротивление R (1—2 *мгом*) почти до такого же потенциала $\left(\frac{U_0}{2}\right)$. Во время следующего импульса обратного хода конденсатор C_3 через кенотрон $Л_3$ заряжается также до потенциала $\frac{U_0}{2}$ (напряжения на C_1 и C_2 при этом вза-



Фиг. 53. Схема импульсного высоковольтного выпрямителя с удвоением напряжения.

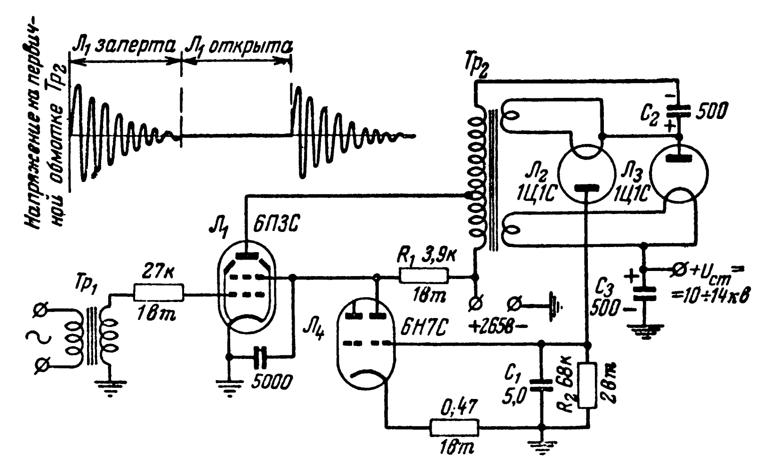
имно компенсируются). В результате сумма напряжений на конденсаторах C_1 и C_3 представляет собой приблизительно удвоенное значение амплитуды импульса напряжения за время обратного хода развертки (U_0).

Достоинством выпрямителей импульсного типа являются их простота, а также безопасность при обслуживании. Последнее обстоятельство объясняется тем, что при увеличении нагрузки, которое может произойти при случайном прикосновении к полюсам выпрямителя, выпрямленное напряжение настолько падает, что не представляет уже опасности для жизни.

Серьезным недостатком выпрямителей импульсного типа является большая величина внутреннего сопротивления, что служит причиной сравнительно больших изменений выпрямленного напряжения при колебаниях тока нагрузки. Стабилизация напряжения импульсных выпрямителей неосуществима без значительного усложнения схемы; поэтому в практически применяемых схемах стабилизация напряжения отсутствует.

Одна из схем *выпрямителей третьего типа*, использующих высокочастотные затухающие колебания генератора с ударным возбуждением, представлена на фиг. 54.

На управляющую сетку тетрода $Л_1$ подается переменное напряжение с большой амплитудой (около 120 *в*) от трансформатора $Тр_1$. Во время отрицательного полупериода сеточного напряжения анодный ток тетрода резко падает и на первичной обмотке трансформатора $Тр_2$ возникает импульс высокого напряжения (около 5—6 *кв*).



Фиг. 54. Схема высоковольтного выпрямителя с генератором затухающих колебаний высокой частоты.

Первичная обмотка трансформатора $Тр_2$ обладает собственной емкостью $C_{соб}$, которая с индуктивностью обмотки образует колебательный контур с собственной частотой около 100 *кгц*. Возникший в момент прекращения анодного тока импульс заряжает емкость $C_{соб}$, в результате чего в контуре возбуждаются затухающие колебания с частотой, равной собственной частоте контура. Следует отметить, что эти колебания могут прекращаться еще до того, как на сетке генераторной лампы $Л_1$ появляется положительный полупериод переменного напряжения и, следовательно, до того, как возникает анодный ток через эту лампу.

Напряжение высокой частоты, возникающее на первичной обмотке трансформатора $Тр_2$, выпрямляется с помощью

схемы удвоения напряжения, отличающейся от описанной ранее обычной схемы (фиг. 50,*а*). Один конец первичной обмотки трансформатора $Тр_2$ соединен через источник низкого напряжения (265 *в*) с землей. В момент, когда верхний конец обмотки имеет отрицательный потенциал по отношению к земле, конденсатор C_2 заряжается через кенотрон $Л_2$ до амплитуды переменного напряжения. Когда верхний конец обмотки становится положительным, напряжение обмотки складывается с напряжением на конденсаторе C_2, в результате чего конденсатор C_3 заряжается через кенотрон $Л_3$ почти до удвоенного напряжения.

Регулировку выпрямленного напряжения можно в некоторых пределах производить, меняя анодное и экранное напряжения генераторной лампы $Л_1$.

В схеме фиг. 54 предусмотрена возможность стабилизации выпрямленного напряжения при изменении тока нагрузки. Для этой цели служит триод $Л_4$. При увеличении тока нагрузки выпрямленное напряжение падает, но одновременно увеличивается падение напряжения на сопротивлении R_2 и увеличивается отрицательный потенциал на сетке триода $Л_4$. Анодный ток лампы $Л_4$ уменьшается, а напряжение на ее аноде увеличивается. Одновременно с этим повышается напряжение на экранной сетке генераторной лампы $Л_1$, что вызывает увеличение переменного напряжения высокой частоты, а следовательно, и выпрямленного напряжения. Таким образом, понижение выпрямленного напряжения при увеличении тока нагрузки автоматически компенсируется действием схемы, в результате чего напряжение на выходе остается почти без изменений. При уменьшении тока нагрузки схема стабилизации уменьшает возросшее напряжение.

Как видно из схемы фиг. 54, для фильтра требуются конденсаторы весьма небольшой емкости. Сердечник трансформатора $Тр_2$ изготовляется из специальной высокочастотной стали или порошкообразного железа. Существенным преимуществом подобных выпрямителей являются их небольшие габариты, получаемые за счет малых размеров фильтра и трансформатора $Тр_2$.

Высокое напряжение, получаемое от этого выпрямителя, не опасно для жизни, так как увеличение тока нагрузки свыше определенного предела резко снижает амплитуду высокочастотных колебаний, а следовательно, и величину выпрямленного напряжения.

Для того чтобы устранить влияние изменений анодного и экранного напряжений генераторной лампы $Л_1$ на величину высокого выпрямленного напряжения, необходимо иметь стабилизованный источник напряжения для питания анода и экранной сетки (265 *в* в схеме фиг. 54).

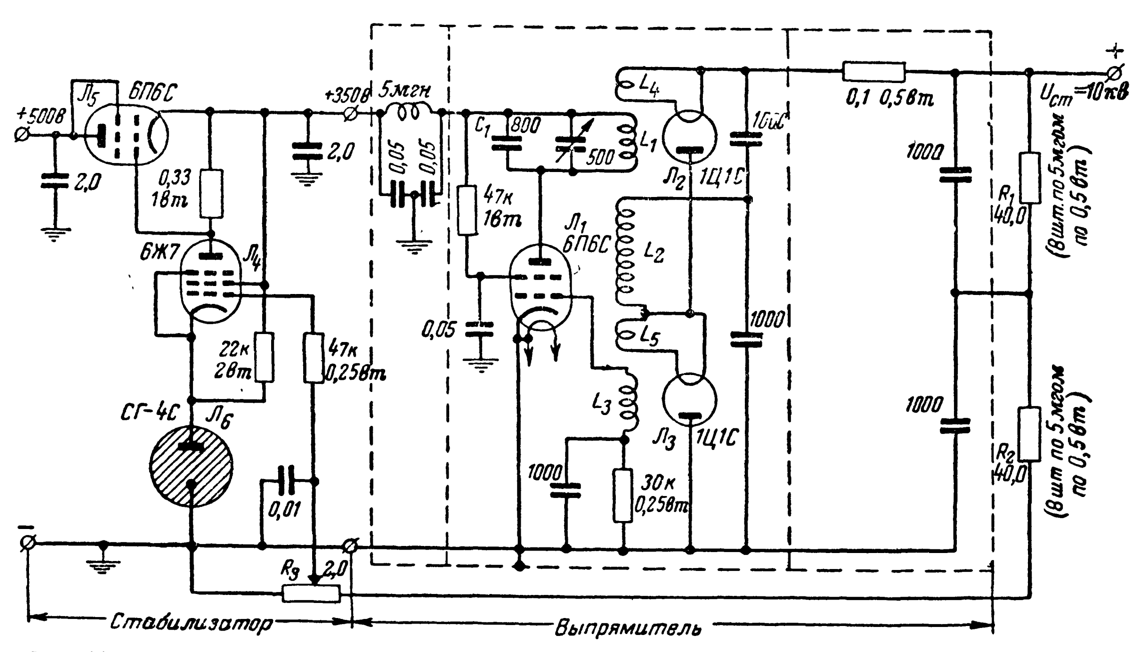
В некоторых выпрямительных схемах описываемого типа для создания резко изменяющегося напряжения в цепи управляющей сетки генераторной лампы $Л_1$ применяют специальные импульсные генераторы (например, блокинг-генераторы) или связывают управляющую сетку лампы $Л_1$ с каким-либо импульсным генератором, имеющимся в данном устройстве.

Выпрямители четвертого типа, использующие для выпрямления напряжение высокой частоты, вырабатываемое специальным генератором с самовозбуждением, в последнее время получают все большее распространение. Эти схемы применяются для получения высоких напряжений до 30 *кв* и даже выше. Схема выпрямителя этого типа, показанная на фиг. 55, позволяет получить выпрямленное напряжение 12 *кв*.

Генератор незатухающих колебаний высокой частоты на тетроде $Л_1$ имеет контур в анодной цепи, состоящий из конденсаторов C_1 и катушки L_1. Катушка обратной связи L_3 включена последовательно с сопротивлением утечки в цепь управляющей сетки $Л_1$. С катушкой L_1 индуктивно связана катушка L_2 вторичного контура. В катушке L_2 (имеющей в 20 раз больше витков, чем в катушке L_1) индуктируется повышенное напряжение высокой частоты, которое затем выпрямляется с помощью обычной схемы удвоения на кенотронах $Л_2$ и $Л_3$. Следует иметь в виду, что катушка L_2 образует вторичный контур, емкость которого складывается из собственной емкости катушки, емкости анод — катод кенотронов и емкости монтажа.

Питание накала кенотронов производится от обмоток L_4 и L_5, индуктивно связанных с катушками L_1 и L_2. Таким образом, генератор высокой частоты обеспечивает всю необходимую мощность, потребляемую выпрямителем.

Наибольшее напряжение на вторичном контуре, а следовательно, и на выходе выпрямителя будет в том случае, когда частота колебаний генератора будет близка к собственной частоте вторичного контура. Изменяя емкость C_1 анодного (первичного) контура генератора, можно изменять частоту генератора, а следовательно, регулировать величи-



Фиг. 55. Схема стабилизованного высоковольтного выпрямителя с генератором незатухающих колебаний высокой частоты.

ну выпрямленного высокого напряжения. Для более устойчивой работы выпрямителя частота генератора выбирается немного ниже собственной частоты вторичного контура. Это снижает выпрямленное напряжение, но зато уменьшает его колебания при изменениях тока нагрузки. Частота генераторов, работающих в схемах подобного типа, лежит обычно в пределах 100—200 *кгц*.

На фиг. 56 приведена фотография макета выпрямителя, собранного по схеме фиг. 55. Выпускаемые отечественной промышленностью кенотроны типа 1Ц1С позволяют получать с помощью схемы фиг. 55 выпрямленное напряжение около 10 *кв*. Понизить напряжение на 2—3 *кв* можно, увеличив емкость C_1 анодного контура.

Катушки трансформатора высокой частоты (L_1, L_2, L_3, L_4 и L_5) наматываются на каркасах из материала, обладающего высокими изоляционными свойствами и малыми потерями на частоте генератора (полистирол, эбонит). Как видно из фиг. 56 все пять катушек насажены на один эбонитовый стержень, укрепленный на эбонитовом основании. Катушки L_2 и L_5 намотаны на секционированном полистироловом каркасе, а остальные катушки — на эбонитовых каркасах (данные катушек см. в табл. 6).

Таблица 6

Основные данные катушек трансформатора высокой частоты

Данные	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
Наружный диаметр каркаса, *мм*	100	64	64	64	64
Длина каркаса, *мм*	16	75	10	10	—
Внутренний диаметр каркаса (обмотки), *мм*	45	38	38	38	38
Число секций катушки	1	8	1	1	1
Ширина секции, *мм*	9,5	1,6	3,2	3,2	1,6
Число витков в секции	125	300	150	2	2
Диаметр провода, *мм*	0,1×27	0,15	0,27	0,71	0,71
Марка провода	ЛЭШО	ПЭШО	ПЭШО	ПЭШО	ПЭШО
Индуктивность, *мгн*	1	145	—	—	—
Добротность катушки при 100 *кгц* (без нагрузки)	150	165	—	—	—

Примечания: 1. L_2 укладывается в первых восьми секциях полистиролового каркаса.
2. Число витков L_4 и L_5 указано для кенотрона 1Ц1С.
3. На весь провод катушки L_4 нужно надеть кембриковую трубку.
4. L_5 укладывается в девятой секции полистиролового каркаса катушки L_2.

Во избежание потерь конструкция трансформатора высокой частоты не должна иметь никаких металлических частей. Генератор и выпрямитель полностью экранируются от остальных элементов схемы, а фильтры высокого и низкого напряжений, кроме того, помещаются во внутренние экранированные отсеки отдельно от деталей генератора и выпрямителя (см. схему фиг. 55). Такое тщательное экранирование необходимо для того, чтобы высокая частота от генератора не попадала в другие цепи схемы, где из-за этого могут возникнуть помехи, нарушающие нормальную работу. Высокое напряжение, создаваемое в схеме выпрямителя с генератором высокой частоты, безопасно для жизни, так как увеличение нагрузки, вызываемое прикосновением к выводам высокого напряжения, срывает генерацию и тем самым снижает выпрямленное напряжение до нуля.

Схема выпрямителя с генератором незатухающих колебаний имеет по сравнению со схемой, использующей генератор затухающих колебаний (фиг. 54), следующие основные преимущества:

1) отсутствие необходимости в источнике импульсного напряжения;

2) легкая регулировка выпрямленного напряжения;

3) повышенный к. п. д. выпрямителя (до 50—60%);

4) пониженное внутреннее сопротивление выпрямителя;

5) увеличенный допустимый ток нагрузки (до 2—3 *ма*);

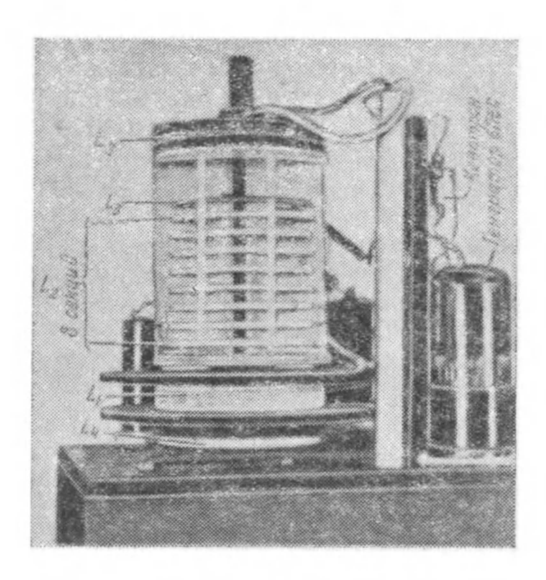
6) возможность изготовления трансформатора высокой частоты без сердечника;

7) возможность стабилизации высокого выпрямленного напряжения не только при изменениях тока нагрузки, но и при изменениях напряжения сети, питающей выпрямитель низкого напряжения (+350 *в*).

В схеме фиг. 55 высокое выпрямленное напряжение зависит от режима работы генераторной лампы, в частности от ее анодного напряжения и напряжения на экранной сетке. Очевидно, что, регулируя анодное и экранное напряжения генераторной лампы, можно поддерживать выходное напряжение высоковольтного выпрямителя постоянным при изменениях тока нагрузки и напряжения питающей сети. Так как мощность высоковольтного выпрямителя позволяет включить на его выходе высокоомный делитель, то для стабилизации питания генераторной лампы можно применить

обычный электронный стабилизатор, управляемый выходным напряжением высоковольтного выпрямителя.

Схема такого стабилизатора для высоковольтного выпрямителя показана слева на фиг. 55. В качестве усилительной лампы применен пентод $Л_4$. Так как анодное и экранное напряжения генераторной лампы $Л_1$ стабилизованы, то влияние изменений напряжения питающей сети на высокое выпрямленное напряжение исключается. Влияние изменения



Фиг. 56. Макет высоковольтного выпрямителя с генератором высокой частоты.

тока нагрузки на высокое выпрямленное напряжение компенсируется в схеме следующим образом. При понижении высокого выпрямленного напряжения, что вызывается увеличением тока нагрузки, уменьшается напряжение на высокоомном делителе $R_1R_2R_3$. Одновременно уменьшается напряжение на той части делителя (R_3), которая включена между сеткой усилительной лампы $Л_4$ и «землей». Напряжение на сетке лампы $Л_4$ становится более отрицательным, анодный ток лампы падает, и падение напряжения на анодном сопротивлении уменьшается. При этом сетка регулирующей лампы $Л_5$ становится менее отрицательной, сопротивление лампы $Л_5$ для постоянного тока уменьшается,

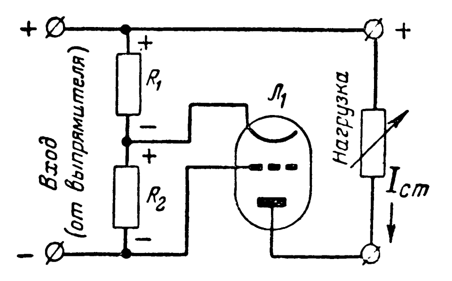
а напряжение на выходе электронного стабилизатора возрастает. В результате возрастает напряжение на аноде и на экранной сетке генераторной лампы $Л_1$, что ведет к увеличению напряжения на выходе высоковольтного выпрямителя. Это увеличение почти полностью компенсирует понижение выходного напряжения, вызванное увеличением тока нагрузки, и, таким образом, высокое выпрямленное напряжение остается почти без изменений.

В случае повышения выходного напряжения при уменьшении тока нагрузки схема стабилизатора действует так, что напряжения на аноде и экранной сетке генераторной лампы уменьшаются. Это приводит к соответствующему снижению выходного напряжения, компенсирующему первоначальное повышение напряжения из-за уменьшения тока нагрузки.

Рассмотрение специальных схем высоковольтных выпрямителей (по типу фиг. 54 и 55) показывает, что поддержание постоянства высокого напряжения в этих схемах требует стабилизации сравнительно низких анодных и экранных напряжений генераторных ламп. В связи с этим стабилизирующие устройства переносятся в цепи низкого напряжения, что позволяет значительно упростить схемы высоковольтных стабилизаторов.

ЭЛЕКТРОННЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ ТОКА

Стабилизаторы тока применяются значительно реже стабилизаторов напряжения. Тем не менее, полезно будет познакомиться с некоторыми простейшими схемами стабилизаторов тока.



Фиг. 57. Упрощенная схема электронного стабилизатора тока.

Принцип действия стабилизатора тока ясен из упрощенной схемы фиг. 57, которая иногда называется мостовой схемой с обратной связью. Эта схема поддерживает неизменный ток в нагрузке как при изменениях входного напряжения, так и при изменениях сопротивления нагрузки, включенной последовательно с регулирующей лампой $Л_1$.

Предположим, что входное напряжение повысилось. Тогда соответственно увеличится падение напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2. Это вызовет одновременное увеличение анодного напряжения регулирующей лампы $Л_1$ за счет увеличения падения напряжения на сопротивлении R_1 и увеличение отрицательного смещения на ее сетке за счет увеличения падения напряжения на сопротивления R_2.

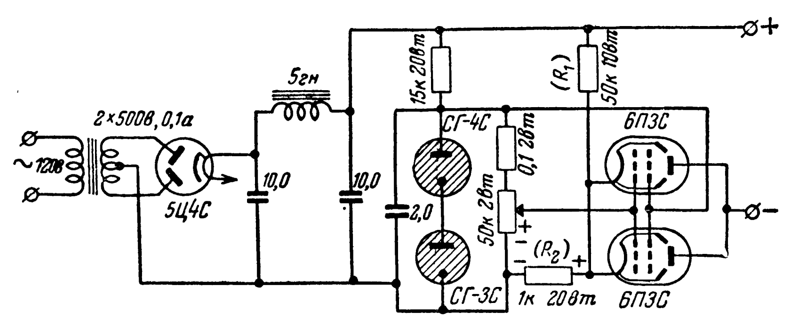
Для того чтобы анодный ток, а следовательно, и ток в нагрузке оставались без изменений, необходимо увеличение напряжения на аноде лампы $Л_1$ скомпенсировать увеличением отрицательного смещения на ее сетке. Известно, что напряжение на сетке влияет на анодный ток в μ раз сильнее, чем анодное напряжение (μ — коэффициент усиления лампы). Поэтому, для того чтобы анодный ток регулирующей лампы не изменялся при увеличении входного напряжения, нужно подобрать сопротивления R_1 и R_2 так, чтобы увеличение напряжения на сопротивлении R_1 (т. е. на аноде) было в μ раз больше увеличения напряжения на сопротивлении R_2 (т. е. на сетке). Очевидно, что при уменьшении входного напряжения уменьшение анодного напряжения лампы $Л_1$ будет скомпенсировано уменьшением отрицательного смещения на ее сетке. Таким образом, сопротивления R_1 и R_2 являются как бы плечами моста, служащего для компенсации изменений входного напряжения.

В то же время сопротивление R_2, включенное в цепь катода регулирующей лампы, является элементом обратной связи по току, при помощи которого достигается стабилизация тока при изменении сопротивления нагрузки. Предположим, что сопротивление нагрузки по каким-либо причинам увеличилось. Это вызовет уменьшение анодного тока и падения напряжения на сопротивлении R_2, а следовательно, и уменьшение отрицательного смещения на сетке регулирующей лампы $Л_1$; сопротивление лампы $Л_1$ для постоянного тока понизится, и ток в цепи нагрузки останется почти без изменений. При уменьшении сопротивления нагрузки смещение на сетке лампы $Л_1$ увеличивается, сопротивление регулирующей лампы повышается, а ток нагрузки также остается почти без изменений. В данном случае работу регулирующей лампы можно сравнить с реостатом, который компенсирует изменения сопротивления включенной последовательно с ним нагрузки и поэтому поддерживает в цепи неизменный ток.

Из сравнения схем электронных стабилизаторов напряжения и тока следует, что в стабилизаторах напряжения сопротивление регулирующей лампы зависит от изменения выходного напряжения, а в стабилизаторах тока — от изменения тока нагрузки.

Схема фиг. 57 непригодна для стабилизации больших токов нагрузки из-за большого отрицательного смещения на сетке регулирующей лампы.

В практике применяется схема стабилизатора, показанная на фиг. 58, принципиально не отличающаяся от схемы



Фиг. 58. Схема электронного стабилизатора тока с обратной связью.

фиг. 57. Сопротивления R_1 и R_2 выполняют функции одноименных сопротивлений в схеме фиг. 57.

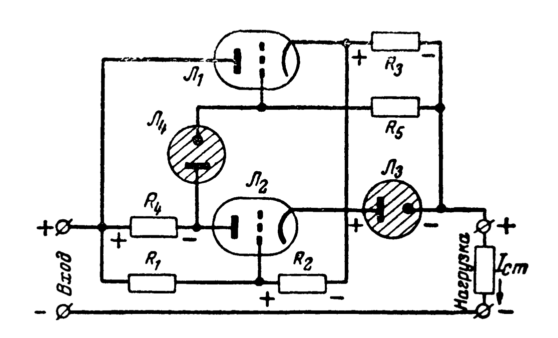
В качестве регулирующих ламп применены два тетрода 6П3С, соединенных параллельно с целью увеличения допустимого тока нагрузки. Экранные сетки тетродов питаются стабилизованным напряжением 255 *в* от последовательно соединенных газовых стабилизаторов СГ-4С и СГ-3С. Для компенсации большого отрицательного смещения, образующегося за счет падения напряжения на катодном сопротивлении R_2, в цепь управляющих сеток включено постоянное (опорное) напряжение, направленное навстречу напряжению на сопротивлении R_2. Это напряжение снимается с потенциометра (50 *ком*), который подключен к источнику того же стабилизованного напряжения 255 *в*. Регулируя с помощью этого потенциометра смещение на управляющих сетках ламп, можно легко установить требуемый ток нагрузки.

Желательно, чтобы регулирующие лампы в схемах стабилизаторов тока обладали большим внутренним сопротив-

лением. Поэтому в качестве регулирующих ламп чаще всего применяются тетроды и пентоды.

Схема фиг. 58 обеспечивает поддержание тока нагрузки 50 *ма* с точностью $\pm 0,25\%$ при изменении напряжения сети на $\pm 15\%$ или при изменении сопротивления нагрузки от 1 до 7 *ком.*

Для получения более высокой стабильности можно применить схему с каскадом усиления, представленную на фиг. 59. Принцип действия схемы заключается в следующем. При увеличении входного напряжения падение напряжения на сопротивлении R_2 увеличивается, отрицательное



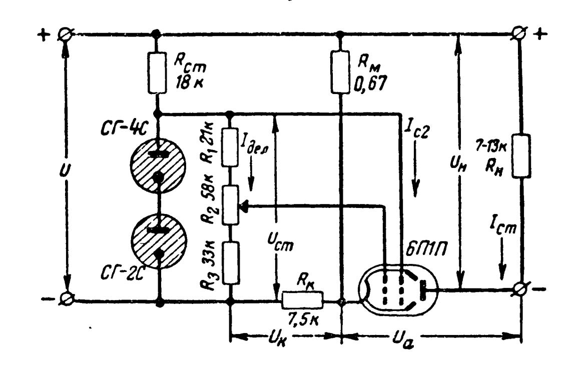
Фиг. 59. Схема электронного стабилизатора тока с одним каскадом усиления.

смещение на сетке усилительной лампы $Л_2$ уменьшается и ее анодный ток увеличивается. Вследствие этого падение напряжения на анодном сопротивлении R_4 увеличивается и сетка регулирующей лампы $Л_1$ становится более отрицательной; сопротивление регулирующей лампы повышается, а ток в цепи нагрузки остается почти без изменения. При уменьшении сопротивления нагрузки ток через катодное сопротивление R_3 возрастает и падение напряжения на нем увеличивается. Это вызывает уменьшение отрицательного смещения на сетке лампы $Л_2$, что, как было показано выше, приводит к стабилизации тока в цепи нагрузки.

Понижение входного напряжения или увеличение сопротивления нагрузки вызывают соответственно уменьшение падения напряжения на сопротивлении R_2 или уменьшение падения напряжения на катодном сопротивлении R_3, что приводит к увеличению отрицательного смещения на сетке лампы $Л_2$, а следовательно, к понижению сопротивления

регулирующей лампы $Л_1$ и стабилизации тока в цепи нагрузки.

Газовый стабилизатор $Л_3$ служит в качестве источника опорного напряжения для лампы $Л_2$, а газовый стабилизатор $Л_4$ создает опорное напряжение для лампы $Л_1$.



Фиг. 60. Схема электронного стабилизатора тока (к примеру 12).

Пример 12. Рассчитать стабилизатор тока на ток $I_{ст} = 15$ *ма* при изменениях сопротивления нагрузки $R_н = 10\,000$ *ом* на $\pm 30\%$ и при колебаниях питающего напряжения U на $\pm 10\%$. Изменение тока нагрузки при этих условиях не должно превышать $\pm 0{,}5$ *ма* ($\pm 0{,}33\%$).

Результаты расчета сведены в табл. 7.

Таблица 7

Расчет электронного стабилизатора тока

$I_{ст}$, *ма*	$R_н$, *ком*	$U_н$, *в*	$U_к$, *в*	U_a, *в*	U, *в*	P_a, *вт*	U_{c_2}, *в*	$U_{ст}$, *в*	U_{c_1}, *в*	I_{c_2}, *ма*	P_{c_2}, *вт*	$\Delta I_{ст}$, *ма*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
15	13	195	125	150	470	2,25	100	225	−4,4	1,5	0,15	
15	7	105	125	345	575	5,2	100	225	—	—	—	0,4

Другие параметры схемы: $R_к = 7{,}5$ *ком*; $I_{дел} = 2$ *ма*; $R_{ст} = 18$ *ком*; $R_м = 0{,}67$ *мгом*.

1. Для получения заданной стабильности тока можно применить стабилизатор без усилителя (по типу схемы фиг. 58). В качестве регулирующей лампы в данном случае целесообразно использовать один лучевой тетрод типа 6П1П. Схема стабилизатора показана на фиг. 60.

2. В графе 1 табл. 7 указывается номинальный ток нагрузки $I_{ст} = 15$ *ма*, в графе 2 записываем максимальное и минимальное значения сопротивления нагрузки:

$$R_{н.\,макс} = 1{,}3\ R_н = 1{,}3 \cdot 10\,000 = 13\,000\ ом;$$

$$R_{н.\,мин} = 0{,}7\ R_н = 0{,}7 \cdot 10\,000 = 7\,000\ ом.$$

3. В графе 3 указывается максимальное и минимальное напряжения $U_н$ на нагрузке:

$$U_{н.\,макс} = I_{ст} R_{н.\,макс} = 15 \cdot 10^{-3} \cdot 13\,000 = 195\ в;$$

$$U_{н.\,мин} = I_{ст} R_{н.\,мин} = 15 \cdot 10^{-3} \cdot 7\,000 = 105\ в.$$

4. В графе 4 указывается падение напряжения $U_к$ на катодном сопротивлении $R_к$. Величину $U_к$ выбирают обычно в пределах 50—200 *в*. Чем больше величина $U_к$, тем лучше стабилизирующие свойства схемы. Однако увеличение $U_к$ связано с возрастанием входного напряжения стабилизатора U на ту же величину. В нашем примере выбираем

$$U_к = 125\ в.$$

5. В графе 5 указываются минимальное и максимальное анодные напряжения регулирующей лампы. Минимальное напряжение $U_{а.мин}$ выбирается по анодным характеристикам (фиг. 61) в области, где анодный ток лампы мало зависит от анодного напряжения. В данном случае выбираем

$$U_{а.\,мин} = 150\ в.$$

Максимальное анодное напряжение регулирующей лампы находится после определения максимального входного напряжения стабилизатора $U_{макс}$ (см. п. 6) по формуле

$$U_{а.\,макс} = U_{макс} - (U_{н.\,мин} + U_к).$$

6. В графе 6 записывается необходимое минимальное и максимально возможное входное напряжение U стабилизатора:

$$U_{мин} = U_{н.\,макс} + U_{а.\,мин} + U_к = 195 + 150 + 125 = 470\ в.$$

Так как по заданию входное напряжение изменяется на $\pm$ 10%, то максимально возможное входное напряжение

$$U_{макс} = \frac{U_{мин}}{0{,}9} \cdot 1{,}1 = \frac{470}{0{,}9} \cdot 1{,}1 = 575\ в.$$

Теперь можно определить максимальное анодное напряжение (см. п. 5):

$$U_{а.\,макс} = U_{макс} - (U_{н.\,мин} + U_к) = 575 - (105 + 125) = 345\ в.$$

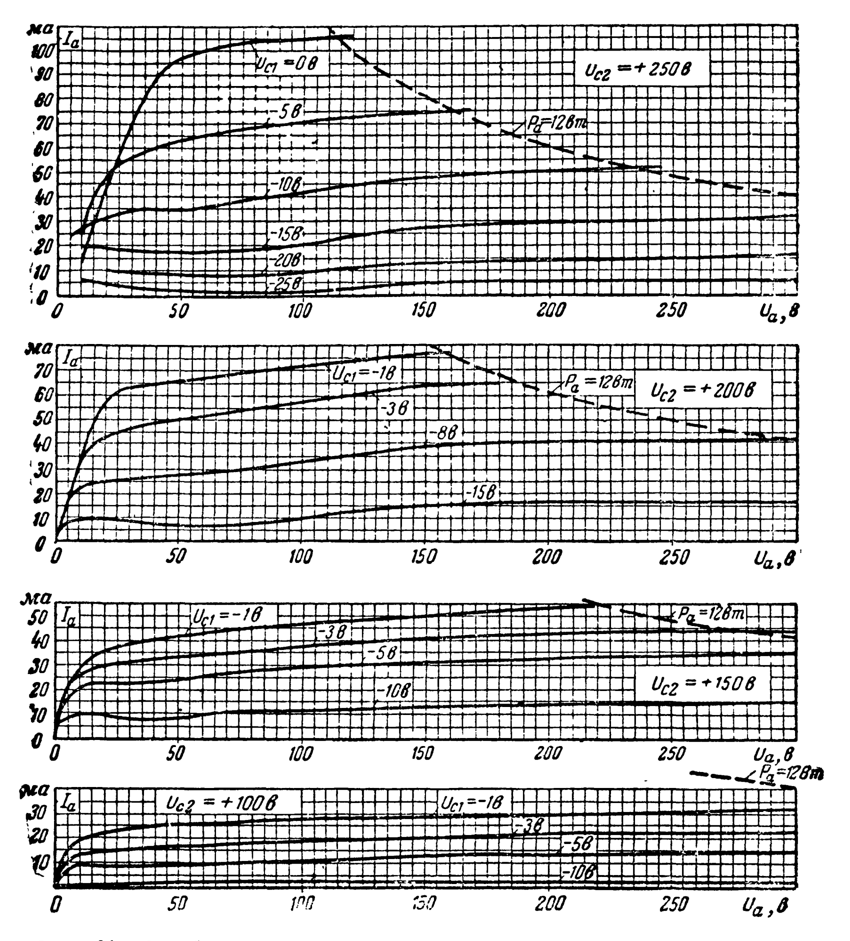
7. Минимальная и максимальная мощность рассеяния на аноде $P_а$ (графа 7) определяется как

$$P_{а.\,мин} = U_{а.\,мин} I_{ст} = 150 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 2{,}25\ вт;$$

$$P_{а.\,макс} = U_{а.\,макс} I_{ст} = 345 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 5{,}2\ вт.$$

$P_{a.макс}$ не превышает максимально допустимой мощности рассеяния на аноде лампы 6П1П (12 *вт*).

8. Стабильное напряжение на экранной сетке U_{c_2} (графа 8) нужно выбирать, исходя из следующих соображений.



Фиг. 61. Семейства анодных характеристик лучевого тетрода типа 6П1П при различных напряжениях на экранной сетке.

Для того чтобы ток экранной сетки не превышал анодного тока и мощность рассеяния на ней не превышала допустимой (2,5 *вт*), экранное напряжение должно быть меньше минимального анодного напряжения.

Известно, что при увеличении анодного напряжения экранный ток падает, и наоборот (фиг. 62). При этом, чем больше будут изменения экранного тока при колебаниях анодного напряжения, тем хуже будет стабилизирующее действие схемы. С этой точки зрения предпочтительнее выбирать низкие экранные напряжения, при которых колебания анодного напряжения вызывают сравнительно небольшие изменения экранного тока (фиг. 62). С другой стороны, надо помнить, что при низком экранном напряжении нельзя стабилизовать большие токи нагрузки.

В нашем примере выбираем (графа 8)

$$U_{c_2} = 100\ \text{в}.$$

9. В графе 9 указывается величина стабилизованного напряжения U_{cm} источника питания экранной сетки, которая определяется по формуле

$$U_{cm} = U_{c_2} + U_к = 100 + 125 = 225\ \text{в}.$$

В качестве источника стабильного напряжения U_{cm} применим последовательно соединенные газовые стабилизаторы СГ-4С и СГ-2С с общим напряжением горения $150 + 75 = 225$ *в*.

10. В графе 10 указывается отрицательное напряжение смещения U_{c_1} на управляющей сетке при минимальном анодном напряжении. Это напряжение определяется из анодных характеристик лампы 6П1П (фиг. 61) и по абсолютной величине не должно быть менее 1—3 *в*.

В данном примере

$$U_{c_1} = -4{,}4\ \text{в}.$$

11. В графе 11 указывается максимальный ток экранной сетки лампы I_{c_2}, который определяется при минимальном анодном напряжении из характеристик, приведенных на фиг. 62. При $U_{a.\,мин} = 150$ *в*, $U_{c_2} = 100$ *в* и $U_{c_1} = -4{,}4$ *в* находим, что $I_{c_2} = 1{,}5$ *ма*.

12. В графе 12 указывается максимальная мощность, рассеиваемая на экранной сетке лампы, определяемая по формуле

$$P_{c_2} = U_{c_2} I_{c_2} = 100 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-3} = 0{,}15\ \text{вт}.$$

Полученное значение P_{c_2} меньше максимально допустимой величины (2,5 *вт*).

13. В графе 13 указывается полное изменение тока нагрузки, происходящее под влиянием изменения входного напряжения, сопротивления нагрузки и тока экранной сетки лампы. Полное изменение тока нагрузки можно определить по приближенной формуле

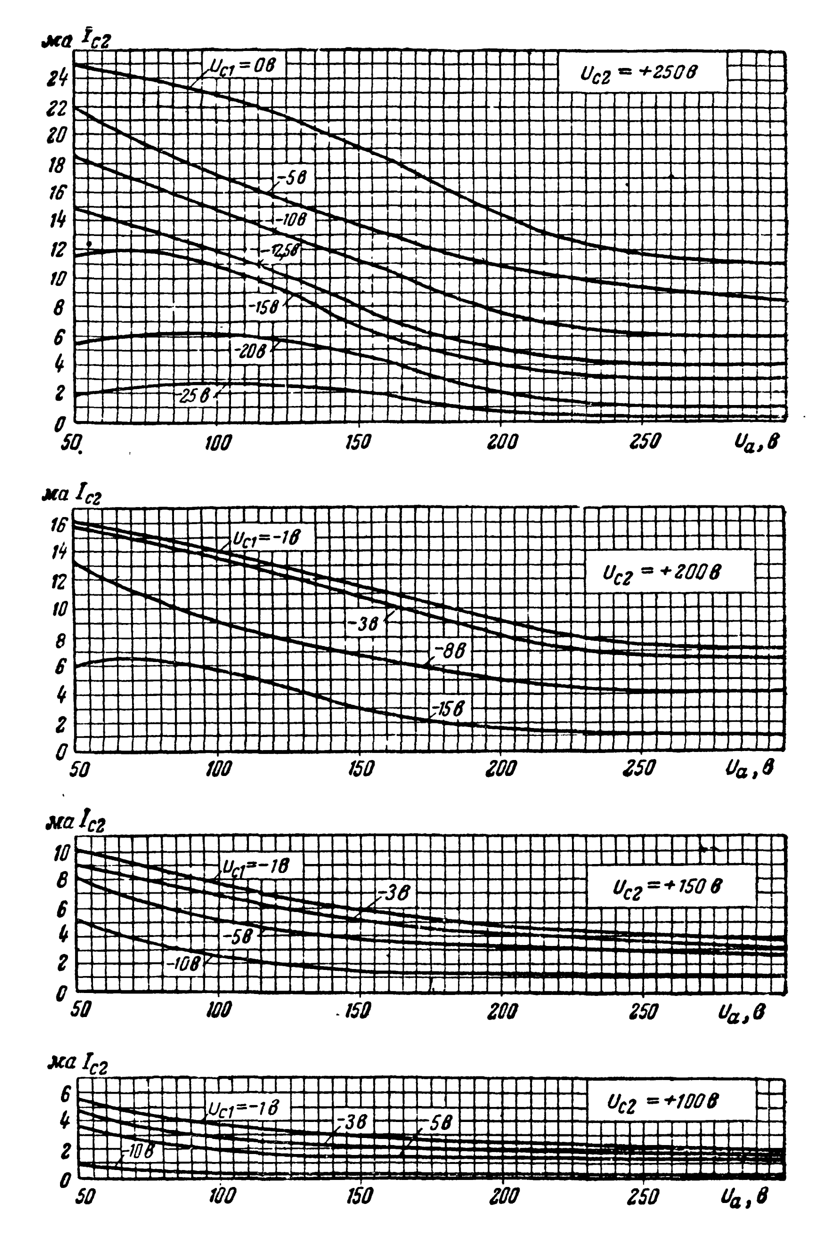
$$\Delta I_{cm} \approx (3 \div 6)\ \frac{U_{a.\,макс} - U_{a.\,мин}}{\mu R_к}\ ^{*}.$$

---

* Точная формула имеет вид

$$\Delta I_{cm} = \frac{U_{a\ макс} - U_{a.\,мин}}{\mu R_к} + \Delta I_{c_2},$$

где ΔI_{c_2} — изменение тока экранной сетки лампы при колебаниях анодного напряжения от $U_{a.\,макс}$ до $U_{a.\,мин}$.



Фиг. 62. Семейства характеристик тока экранной сетки лучевого тетрода типа 6П1П при различных напряжениях на экранной сетке.

В этой формуле:

μ — коэффициент усиления лампы в рабочей области, определяемый из анодных характеристик фиг. 61:

$$\mu = SR_i = 4{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 67 \cdot 10^3 = 300;$$

$R_к$ — сопротивление в цепи катода регулирующей лампы:

$$R_к = 0{,}9 \cdot \frac{U_к}{I_{ст}} = 0{,}9 \frac{125}{15 \cdot 10^{-3}} = 7\,500 \text{ ом}.$$

Полное изменение тока нагрузки составляет

$$\Delta I_{ст} \approx 4{,}5 \cdot \frac{345 - 150}{300 \cdot 7\,500} \approx 0{,}4 \text{ ма } (\pm 0{,}2 \text{ ма}),$$

или $\pm 0{,}13\%$ от номинального тока нагрузки 15 *ма*, что удовлетворяет требованию задания.

14. Ток $I_{дел}$, потребляемый делителем R_1, R_2, R_3, обычно выбирается в пределах от 1 до 5 *ма*.

Если $I_{дел} = 2$ *ма*, то

$$R_1 + R_2 + R_3 = \frac{U_{ст}}{I_{дел}} = \frac{225}{2 \cdot 10^{-3}} = 112\,000 \text{ ом}.$$

Соотношение между сопротивлениями делителя определяется из выражения

$$R_3 + 0{,}5R_2 = \frac{U_к}{U_{ст}} (R_1 + R_2 + R_3) = \frac{125}{225} 112\,000 = 62\,000 \text{ ом}.$$

Исходя из этого, выбираем:

$$R_3 = 33\,000 \text{ ом}; \quad R_2 = 58\,000 \text{ ом}.$$

Находим:

$$R_1 = 112\,000 - (33\,000 + 58\,000) = 21\,000 \text{ ом}.$$

15. Ограничивающее сопротивление $R_{ст}$ должно быть выбрано таким, чтобы при колебаниях входного напряжения ток через газовые стабилизаторы лежал в пределах от 5 до 30 *ма*. Если задаться минимальным током через газовые стабилизаторы $I_{л.\,мин} = 10$ *ма*, то

$$R_{ст} = \frac{U_{мин} - U_{ст}}{I_{л.\,мин} + I_{дел} + I_{c_2}} = \frac{470 - 225}{(10 + 2 + 1{,}5)\,10^{-3}} \approx 18\,000 \text{ ом}.$$

Максимальный ток через газовые стабилизаторы составит

$$I_{л.макс} = \frac{U_{макс} - U_{ст}}{R_{ст}} - I_{дел} - I_{c_2} = \frac{575 - 225}{18\,000} -$$

$$- 2 \cdot 10^{-3} - 1{,}5 \cdot 10^{-3} \approx 16 \cdot 10^{-3} \, a = 16 \text{ ма}.$$

16. Сопротивление $R_м$ для компенсации изменений входного напряжения находим из приближенной формулы

$$R_м \approx (0,2 \div 0,4)\,\mu R_к = 0,3 \cdot 300 \cdot 7\,500 = 675\,000\ \textit{ом}.$$

Величина этого сопротивления уточняется при регулировке стабилизатора.

ВЫПРЯМИТЕЛИ

Нормальная работа электронного стабилизатора в значительной степени зависит от правильного выбора выпрямителя. Выходные параметры выпрямителя (выпрямленное напряжение и выпрямленный ток) определяются в результате расчета схемы стабилизатора. Рассмотрим способы расчета основных выпрямительных схем.

В радиолюбительской практике чаще всего встречаются кенотронные и реже купроксные или селеновые выпрямители. Сглаживающий фильтр этих выпрямителей обычно начинается с емкости; в таких случаях говорят, что выпрямитель работает на емкость. Нужно иметь в виду, что расчет выпрямителей, работающих с фильтром без входной емкости или вообще без фильтра, существенно отличается от расчета выпрямителей, работающих на емкость. Наличие входной емкости (при прочих равных условиях) повышает выпрямленное напряжение и значительно уменьшает величину пульсации. Так как от величины входной емкости фильтра зависит режим работы выпрямителя, то в расчет выпрямителя, работающего на емкость, входит расчет необходимой входной емкости. Для кенотронных, селеновых и купроксных выпрямителей применим одинаковый метод расчета.

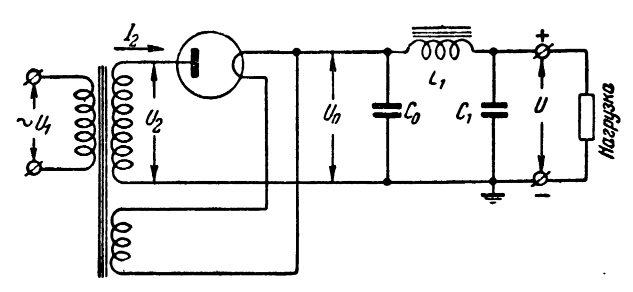
Электрический расчет выпрямителя сводится к выбору схемы выпрямителя и вентиля (кенотрона или селенового столбика), определению напряжения вторичной обмотки (U_2) и токов вторичной и первичной обмоток трансформатора (I_2 и I_1) и выбору входной емкости фильтра (C_0).

При всех приводимых расчетах частота питающей сети принимается равной 50 *гц* ($f = 50$ *гц*).

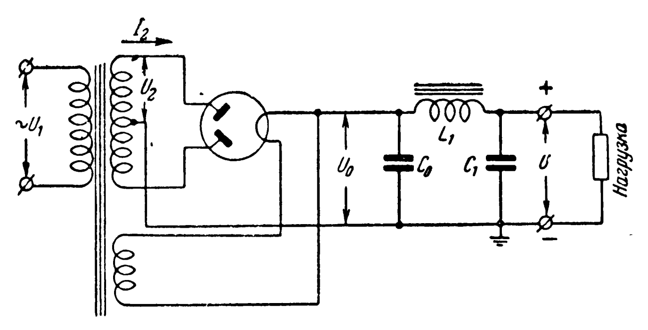
Выбор схемы выпрямителя. Схема выпрямителя выбирается в зависимости от заданной мощности выпрямителя, величины допустимой пульсации выпрямленного напряжения, заданного значения выпрямленного напряжения, а в некоторых случаях и от имеющихся в наличии типов вентилей (кенотронов или селеновых столбиков).

Однополупериодную схему (фиг. 63) можно рекомендовать для выпрямления мощности не более 10—15 *вт* и в тех случаях, когда можно допустить повышенную пульсацию выпрямленного напряжения.

При выпрямленной мощности более 10—15 *вт* обычно применяют двухполупериодную схему со средней точкой



Фиг. 63. Схема однополупериодного выпрямителя с однозвенным фильтром.



Фиг. 64. Схема двухполупериодного выпрямителя с фильтром.

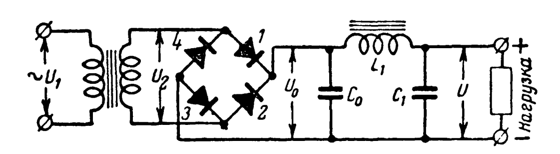
(фиг. 64); двухполупериодная схема, кроме того, позволяет уменьшить пульсацию выпрямленного напряжения по сравнению с однополупериодной схемой без увеличения емкости и индуктивности сглаживающего фильтра.

Мостовая схема (фиг. 65) обладает положительными качествами двухполупериодной схемы, но применяется обычно только в случае использования селеновых вентилей.

Схема удвоения (см. фиг. 50,*а*) чаще всего применяется в бестрансформаторных выпрямителях или в тех случаях,

когда напряжение вторичной обмотки трансформатора недостаточно для получения необходимого выпрямленного напряжения.

Иногда наличие того или иного кенотрона или селенового столбика определяет выбор схемы выпрямителя. Например, если имеющийся кенотрон обладает малой величиной допустимого обратного напряжения, то при невозможности применить его в однополупериодной или двухполупериодной схемах целесообразно использовать его в схеме удвоения, где он сможет обеспечить требуемое выпрямленное напряжение.



Фиг. 65. Мостовая схема выпрямителя с фильтром.

Выбор кенотрона и селенового столбика. Выбранный вентиль (кенотрон или селеновый столбик) должен удовлетворять следующим требованиям:

1) максимально допустимый выпрямленный ток должен быть не меньше, чем заданный выпрямленный ток I_0;

2) максимально допустимое обратное напряжение должно быть не меньше, чем максимальное обратное напряжение $U_{обр}$, развиваемое в выбранной схеме;

3) максимально допустимый импульс выпрямленного тока должен быть не меньше, чем максимальный импульс тока $I_{макс}$, возникающий в выбранной схеме.

Зная эти три величины (отнесенные к одному плечу схемы выпрямителя), можно из табл. 8 и 9 выбрать соответствующий кенотрон или селеновый столбик.

В табл. 10 приведены значения выпрямленного тока и ориентировочные значения $U_{обр}$ и $I_{макс}$, приходящиеся на одно плечо в зависимости от схемы выпрямителя, от выпрямленного напряжения U_0 и от полного выпрямленного тока I_0. Очевидно, что в каждое плечо схемы выпрямителя может быть включен либо кенотрон, либо селеновый столбик.

Таблица 8

Основные параметры некоторых кенотронов

Обозначение лампы	Количество анодов	Напряжение накала, *в*	Ток накала, *а*	Максимально допустимый выпрямленный ток, *ма*	Максимально допустимая амплитуда обратного напряжения, *в*	Максимально допустимый импульс тока, *ма*	Среднее внутреннее сопротивление (на 1 анод), *ом*	Ориентировочная величина максимального выпрямленного напряжения, *в*
6Х6С*	2	6,3	0,3	9×2	465	50×2	500	150
6Х2П*	2	6,3	0,3	10×2	450	90×2	250	150
1Ц1С	1	0,7	0,185	0,5	15 000	5	7 500	5 000**
1Ц7С	1	1,25	0,2	2	30 000	17	14 000	10 000**
2Ц2С	1	2,5	1,75	7	12 500	100	4 500	4 200
5Ц3С	2	5	3	125×2	1 700	750×2	200	570
5Ц4С	2	5	2	62,5×2	1 350	375×2	150	450
5Ц4М	2	5	2	70×2	1 550	415×2	150	520
5Ц8С	2	5	5	210×2	1 700	1 200×2	200	570
5Ц9С	2	5	3	102×2	1 700	600×2	300	570
6Ц5С	2	6,3	0,6	37×2	1 375	300×2	250	460
6Ц4П	2	6,3	0,6	37×2	1 000	300×2	250	400
30Ц6С	2	30	0,3	60×2	500	500×2	150	200
В1-0,03/13	1	2,5	4,3	30	13 000	300	1 000	4 500
В1-0,02/20	1	2,5	3	20	20 000	100	2 000	7 000
В1-0,1/30	1	5	5	100 (150)***	30 000 (15 000)***	400 (600)***	1 000	10 000 (5 000)***

* Кенотроны имеют раздельные катоды.

** Величина выпрямленного напряжения указана для случая работы кенотронов в обычных схемах выпрямителей. При работе этих кенотронов в схемах импульсных выпрямителей (см. фиг. 52) выпрямленное напряжение может достигать 13—14 *кв* для 1Ц1С и 25—27 *кв* для 1Ц7С.

*** В скобках указан второй режим использования кенотрона.

Электрические параметры селеновых дисков отечественного производства

Таблица 9

Наружный диаметр селеновых дисков, *мм*	5	7,2	18	25	35	45	67	84	100	112
Максимально допустимый выпрямленный ток, *ма*	1,2	6	40	75	150	300	600	1 200	1 500	2 000
Внутреннее сопротивление 1 диска, *ом*	300	90	15	5	2,5	1,2	0,5	0,25	0,15	0,12

Примечания: 1. Максимально допустимая амплитуда обратного напряжения 25 *в* на 1 диск.

2. Внутреннее сопротивление диска, приведенное в таблице ($r_{i\,табл}$), соответствует максимально допустимому выпрямленному току для данного диска ($I_{0\,доп}$). Внутреннее сопротивление диска (r_i), когда выпрямленный ток (I_0) меньше максимального, можно определить из приближенной формулы

$$r_i = r_{i\,табл}\sqrt{\frac{I_{0\,доп}}{I_0}}.$$

3. При эксплуатации селеновых выпрямителей в условиях окружающей температуры 60—70° С рекомендуется снижать указанные в таблице значения выпрямленного тока и обратного напряжения на 40—50%.

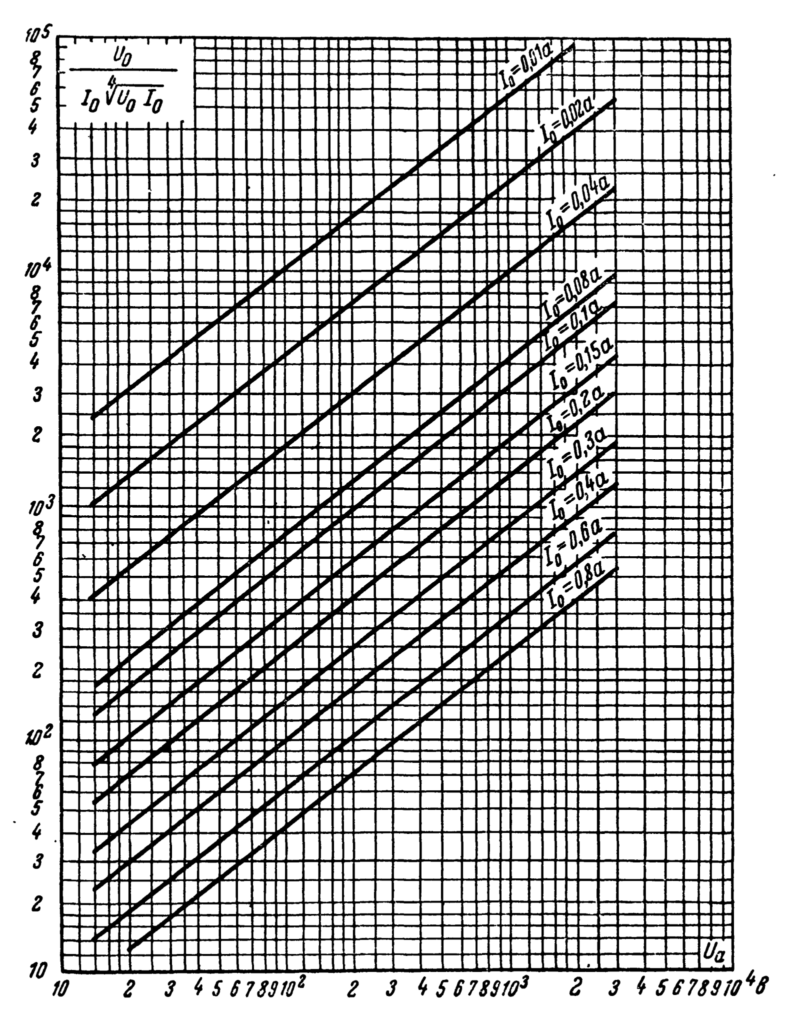
4. Сопротивление селенового столбика, составленного из N последовательно включенных дисков, равно Nr_i.

Формулы для расчета выпрямителей, работающих на емкость

Таблица 10

Схема выпрямителя	Число плеч в схеме	Выпрямленный ток в одном плече	Обратное напряжение на плече $U_{обр}$	Максимальный импульс тока в плече $I_{макс}$	Значение коэффициента k	Сопротивление фазы выпрямителя $R_ф$	Значение коэффициента m	Ток вторичной обмотки трансформатора I_2	Ток первичной обмотки трансформатора I_1	Габаритная мощность трансформатора $P_{габ}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Однополупериодная	1	I_0	$3U_0$	$7I_0$	0,09	$R_i + r_{Tp}$	1	I_0D	$1,2n\sqrt{I_2^2-I_0^2}$	$0,95U_2I_2$
Двухполупериодная	2	$\frac{I_0}{2}$	$3U_0$	$3,5I_0$	0,18	$R_i + r_{Tp}$	2	$\frac{I_0}{2}D$	$1,7nI_2$	$1,7U_2I_2$
Мостовая	4	$\frac{I_0}{2}$	$1,5U_0$	$3,5I_0$	0,15	$2R_i + r_{Tp}$	2	$\frac{I_0}{1,4}D$	$1,2nI_2$	U_2I_2
Удвоения	2	I_0	$1,5U_0$	$7I_0$	0,04	$R_i + r_{Tp}$	1	$1,4\,I_0D$	$1,2nI_2$	U_2I_2

Определение величины сопротивления фазы выпрямителя. Для расчета кенотронного или селенового выпрямителя необходимо определить полное сопротивление фазы выпрямителя $R_ф$. Фазой выпрямителя называется цепь, в которой происходит процесс выпрямления.



Фиг. 66. Вспомогательные кривые для определения сопротивления трансформатора выпрямителя.

Полное сопротивление фазы выпрямителя $R_ф$ слагается из внутреннего сопротивления кенотронов R_i или селеновых дисков r_i, включенных в фазу и из сопротивления обмоток трансформатора r_{Tp}, участвующих в работе этой фазы. Значения R_i для кенотронов приведены в табл. 8, а значения r_i для селеновых дисков — в табл. 9.

При подсчете внутреннего сопротивления надо помнить, что при параллельном включении анодов кенотронов или селеновых выпрямителей их внутреннее сопротивление соответственно уменьшается по сравнению со значениями, приведенными в табл. 8 и 9 (при параллельном включении двух анодов — в 2 раза, трех анодов — в 3 раза и т. д.).

Второе слагаемое сопротивления фазы — сопротивление обмоток трансформатора r_{Tp} — представляет собой сопротивление вторичной обмотки, участвующей в работе фазы, плюс так называемое приведенное сопротивление первичной обмотки. Так как величина сопротивления обмоток трансформатора r_{Tp} в начале расчета выпрямителя обычно неизвестна, то ее определяют приближенно с помощью следующей формулы, полученной на основании практических данных:

$$r_{Tp} = k\frac{U_0}{I_0\sqrt[4]{U_0 I_0}}\,. \qquad (22)$$

Значения коэффициента k приведены в табл. 10. Там же приведена величина полного сопротивления фазы $R_ф$ в зависимости от схемы выпрямителя. Для упрощения вычислений величину $\frac{U_0}{I_0\sqrt[4]{U_0 I_0}}$ можно найти из графика фиг. 66.

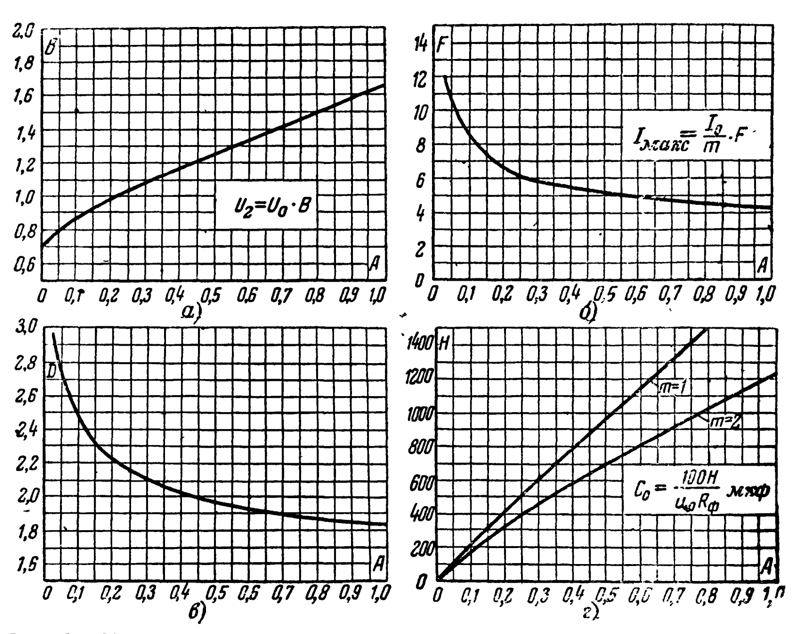
Определение величины напряжения вторичной обмотки трансформатора. Для определения величины необходимого напряжения вторичной обмотки, а также и для определения других параметров выпрямителя необходимо вычислить вспомогательный коэффициент по формуле

$$A = \frac{3{,}14 I_0 R_ф}{m U_0}, \qquad (23)$$

где I_0 — полный выпрямленный ток, *а*;
U_0 — полное выпрямленное напряжение, *в*;
$R_ф$ — полное сопротивление фазы выпрямителя, *ом*;
m — коэффициент, зависящий от схемы выпрямителя (см. табл. 10).

Из графика фиг. 67,*а* находим коэффициент *B*, соответствующий вычисленному значению *A*, и определяем величину требуемого напряжения вторичной обмотки трансформатора U_2 из выражения

$$U_2 = U_0 B. \qquad (24)$$



Фиг. 67. Кривые для расчета выпрямителя, работающего на емкость.

Следует отметить, что при расчете схемы удвоения в формулы (23) и (24) следует подставлять значение половины полного выпрямленного напряжения, даваемого схемой, т. е. $\frac{U_0}{2}$.

Определение величин обратного напряжения и импульса выпрямленного тока. При выборе кенотрона или селенового столбика величины обратного напряжения $U_{обр}$ и импульса выпрямленного тока $I_{макс}$ определялись ориентировочно по формулам табл. 10. После вычисления коэффициента *A* и определения величины напряжения вторичной обмотки U_2 можно уточнить значения $U_{обр}$ и $I_{макс}$.

Максимальное обратное напряжение для схем одно-полупериодной, двухполупериодной и удвоения определяется из выражения

$$U_{обр} = 2{,}8U_2, \quad (25)$$

а для мостовой схемы

$$U_{обр} = 1{,}4U_2. \quad (26)$$

Для определения величины импульса выпрямленного тока нужно из графика фиг. 67,*б* найти коэффициент F по известной величине A. Импульс тока определяется по формуле

$$I_{макс} = \frac{I_0}{m} F. \quad (27)$$

Величины $U_{обр}$ и $I_{макс}$, вычисленные по приведенным формулам, не должны, конечно, превышать максимально допустимых значений, указанных в табл. 8 и 9. Для селеновых и купроксных выпрямителей величина максимально допустимого импульса тока обычно в 8—10 раз больше максимального значения выпрямленного тока, допустимого для данного выпрямителя.

В случае, если вычисленные значения $U_{обр}$ или $I_{макс}$ превышают максимально допустимые величины, следует выбрать другой тип кенотрона или селенового столбика и сделать соответствующий перерасчет.

Определение величин токов вторичной и первичной обмоток трансформатора. Для определения величин токов первичной и вторичной обмоток трансформатора нужно предварительно найти из графика фиг. 67,*в* вспомогательный коэффициент D по известному значению коэффициента A.

Зная коэффициент D и полный выпрямленный ток I_0, можно по формулам табл. 10 найти значение тока вторичной обмотки трансформатора I_2 в зависимости от схемы выпрямителя.

Значение тока первичной обмотки I_1 определяется по формулам, приведенным в табл. 10. При этом для определения тока I_1 нужно заранее вычислить коэффициент трансформации n трансформатора, определяемый как отно-

шение напряжения вторичной обмотки U_2 к напряжению первичной обмотки U_1, включаемой в питающую сеть:

$$n = \frac{U_2}{U_1}.$$

Формулы для определения тока первичной обмотки, приведенные в табл. 10, даны с учетом тока холостого хода трансформатора. Если кроме анодной обмотки трансформатор имеет еще обмотки накала (или другие обмотки), то общий ток первичной обмотки находится как сумма токов:

$$I_{1\,общ} = I_1 + I_3\frac{U_3}{U_1} + I_4\frac{U_4}{U_1} + \ldots, \qquad (28)$$

где I_1 определяется по формулам табл. 10;
U_1 — напряжение первичной (сетевой) обмотки, *в*;
I_3, I_4 и т. д. — токи дополнительных обмоток, *а*;
U_3, U_4 и т. д. — напряжения дополнительных обмоток, *в*.

Определив значения напряжений и токов обмоток, мы получим, таким образом, необходимые данные для расчета трансформатора выпрямителя.

Определение входной емкости фильтра выпрямителя. Как было указано ранее, величина входной емкости фильтра C_0 должна быть определена при расчете выпрямителя, так как от правильного выбора этой емкости зависит нормальная работа выпрямителя.

Значение входной емкости C_0 (в микрофарадах) определяется из формулы

$$C_0 = \frac{H \cdot 100}{u_0 R_ф}, \qquad (29)$$

где H находится из графика фиг. 67,*г* по известным величинам коэффициентов A и m;
u_0 — амплитуда пульсации на входной емкости C_0 в процентах от выпрямленного напряжения U_0, %;
$R_ф$ — сопротивление фазы выпрямителя, *ом*.

По этой же формуле определяется значение каждой из двух входных емкостей (C_{01} и C_{02}) в схеме удвоения (см. фиг. 50,*а*).

Величиной u_0 обычно задаются, выбирая ее в пределах от 2 до 15%. Следует иметь в виду, что при амплитуде пульсации u_0 выше 15% нарушается нормальная работа выпрямителя.

Для снижения величины пульсации до десятых и сотых долей процента используются однозвенные или двухзвенные сглаживающие фильтры типа LC или RC, которые включаются после входной емкости C_0.

Определение выпрямленного напряжения при изменении тока нагрузки. Часто, в особенности в условиях радиолюбительской практики, возникает необходимость использовать существующий выпрямитель для питания нагрузки, отличающейся от той, на которую был рассчитан этот выпрямитель.

Известно, что при увеличении тока нагрузки выпрямителя I_0 выпрямленное напряжение U_0 падает, а при уменьшении тока нагрузки выпрямленное напряжение возрастает.

Для того чтобы определить, какое выпрямленное напряжение даст выпрямитель при любом токе нагрузки, можно воспользоваться приближенной формулой

$$U_0 = 1{,}3\,U_2 - I_0 \frac{4R_ф}{m}, \qquad (30)$$

где U_2 — напряжение на вторичной обмотке трансформатора, *в*;

I_0 — ток нагрузки, *а*;

$R_ф$ — сопротивление фазы выпрямителя, *ом*;

m — коэффициент, зависящий от схемы выпрямителя.

Для схемы удвоения формула (30) дает значение $\frac{U_0}{2}$.

При использовании готового выпрямителя не следует забывать, что увеличение тока нагрузки I_0 допустимо лишь до такой величины, при которой кенотрон, селеновый столбик или обмотки трансформатора не будут перегружаться.

Выбор сердечника для силового трансформатора. Размеры сердечника трансформатора зависят, в первую очередь, от его мощности. Для трансформаторов, работающих в некоторых схемах выпрямителей (в том числе в однополупериодной и двухполупериодной), понятие мощности трансформатора несколько усложняется тем, что мощность (вольтамперы) вторичной обмотки не равна мощности (вольтамперам) первичной обмотки из-за наличия во вторичной обмотке постоянной составляющей выпрямленного тока. Ввиду этого вводится понятие „габа-

ритной мощности" трансформатора $P_{габ}$, которая представляет собой полусумму вольтампер первичной и всех остальных обмоток (второй, третьей и т. д.).

В табл. 10 даны значения габаритной мощности трансформатора в зависимости от схемы выпрямителя.

Для подсчета габаритной мощности трансформатора значения напряжения на вторичной обмотке U_2 и тока вторичной обмотки I_2 следует брать из расчета выпрямителя. Если один трансформатор питает несколько выпрямителей и имеет, кроме того, еще обмотки накала, то полная габаритная мощность трансформатора определяется как сумма требуемых габаритных мощностей для всех выпрямителей плюс мощность всех обмоток накала.

Размеры сердечника определяются сечением стали Q_c и площадью окна Q_o, в котором располагаются обмотки трансформатора. Q_c и Q_o сердечника связаны с габаритной мощностью трансформатора формулой

$$Q_c Q_o = 1{,}6\, P_{габ}, \qquad (31)$$

где Q_c — сечение стали сердечника, *см*²;

Q_o — площадь окна сердечника, *см*²;

$P_{габ}$ — габаритная мощность трансформатора, *ва*.

Эта формула дает правильные результаты для трансформаторов с обмотками, выполненными из эмалированного провода (марки ПЭ или ПЭЛ) и при использовании нормальной трансформаторной стали марки Э4А или Э4АА. В случае применения проводов марки ПЭШО или ПШД полученный по этой формуле результат следует увеличить в 1,3—1,5 раза. Формула пригодна как для броневых, так и для стержневых типов сердечников. Размеры некоторых употребительных стандартных пластин для сердечников даны в табл. 1 (см. стр. 23).

Определение числа витков и диаметра провода обмоток трансформатора. Число витков первичной (сетевой) обмотки трансформатора определяется по формуле

$$w_1 = 50\,\frac{U_1}{Q_c}, \qquad (32)$$

а число витков вторичной обмотки (и всех других обмоток) — по формуле

$$w_2 = 56 \frac{U}{Q_c}. \qquad (33)$$

В этих формулах:

w — число витков соответствующей обмотки;
U напряжение на соответствующей обмотке, *в*;
Q_c — сечение стали сердечника, *см*².

Диаметр проводов обмоток при плотности тока 2,5 *а/мм*² определяется по формуле

$$d = 0{,}7\sqrt{I}, \qquad (34)$$

где d — диаметр провода без изоляции, *мм*;
I — величина тока в обмотке, *а*.

Пример 13. Расчет выпрямителя для питания электронного стабилизатора напряжения по схеме примера 10.

1. Из табл. 5 (см. стр. 80) следует, что выпрямитель должен давать при номинальном напряжении сети 120 *в* выпрямленное напряжение U=495 *в* при токе 70 *ма*. Схема выпрямителя выбрана двухполупериодная (см. фиг. 44). Полагая, что падение напряжения на дросселе фильтра $U_{Др}$ составит 20 *в*, получаем окончательные данные для расчета выпрямителя:

$$U_0 = U + U_{Др} = 495 + 20 = 515 \text{ в}; \quad I_0 = 70 \text{ ма}.$$

2. Для выбора кенотрона определим из табл. 10 следующие вели чины (графы 3, 4 и 5):

ток в одном плече схемы

$$\frac{I_0}{2} = \frac{70}{2} = 35 \text{ ма};$$

обратное напряжение на плече

$$U_{обр} \approx 3U_0 = 3 \cdot 515 = 1\,545 \text{ в};$$

импульс тока в плече

$$I_{макс} \approx 3{,}5\, I_0 = 3{,}5 \cdot 70 = 245 \text{ ма}.$$

3. Из табл. 8 выбираем подходящий по параметрам кенотрон типа 5Ц4М, который допускает:

ток через один анод 70 *ма* (полный выпрямленный ток 140 *ма*);
обратное напряжение 1 550 *в*; импульс тока через один анод 415 *ма*.

Таким образом, в каждое плечо схемы можно включить по одному аноду кенотрона.

Внутреннее сопротивление кенотрона 5Ц4М

$$R_i = 150 \text{ ом (на 1 анод)}.$$

4. Найдем сопротивление трансформатора по формуле (22) или из графика фиг. 66:

$$r_{Tp} = k \frac{U_0}{I_0 \sqrt[4]{U_0 I_0}} = 0,18 \frac{515}{0,07 \sqrt[4]{515 \cdot 0,07}} = 540 \text{ ом.}$$

5. Сопротивление фазы выпрямителя (табл. 10, графа 7)

$$R_{ф} = R_i + r_{Tp} = 150 + 540 = 690 \text{ ом.}$$

6. Находим коэффициент A по формуле (23):

$$A = \frac{3,14 I_0 R_{ф}}{m U_0} = \frac{3,14 \cdot 0,07 \cdot 690}{2 \cdot 515} = 0,147.$$

7. Из графика фиг. 67,*а* находим коэффициент B и определяем напряжение на вторичной обмотке трансформатора (на одной половине) по формуле (24):

$$U_2 = U_0 B = 515 \cdot 0,92 = 470 \text{ в.}$$

8. Уточняем величину обратного напряжения на кенотроне по формуле (25):

$$U_{обр} = 2,8 U_2 = 2,8 \cdot 470 = 1\,320 \text{ в.}$$

9. Из графика фиг. 67,*б* находим коэффициент F и уточняем величину импульса выпрямленного тока в схеме по формуле (27):

$$I_{макс} = \frac{I_0}{m} F = \frac{70}{2} 7,2 = 250 \text{ ма.}$$

Таким образом, кенотрон типа 5Ц4М выбран правильно.

10. Из графика фиг. 67,*в* находим коэффициент D и по формуле табл. 10 (графа 9) определяем ток вторичной обмотки трансформатора:

$$I_2 = \frac{I_0}{2} D = \frac{70}{2} 2,3 = 80 \text{ ма.}$$

11. По формуле табл. 10 (графа 10) находим ток первичной обмотки трансформатора:

$$I_1 = 1,7 n I_2 = 1,7 \frac{470}{120} 0,08 = 0,535 \text{ а.}$$

12. Кроме анодной обмотки трансформатор должен иметь следующие обмотки накала:

$U_3 = 5$ *в* и $I_3 = 2$ *а* для кенотрона 5Ц4М;
$U_4 = 6,3$ *в* и $I_4 = 0,9$ *а* для регулирующей лампы 6П3С;
$U_5 = 6,3$ *в* и $I_5 = 0,3$ *а* для усилительной лампы 6Г7.

По формуле (28) определяем общий ток первичной обмотки трансформатора с учетом потребления по обмоткам накала:

$$I_{1\,общ} = I_1 + I_3 \frac{U_3}{U_1} + I_4 \frac{U_4}{U_1} + I_5 \frac{U_5}{U_1} = 0,535 + 2 \frac{5}{120} + $$

$$+ 0,9 \frac{6,3}{120} + 0,3 \frac{6,3}{120} = 0,681 \text{ а.}$$

13. Из графика фиг. 67,*г* находим коэффициент H и по формуле (29) определяем необходимую входную емкость фильтра, задаваясь пульсацией $u_0 = 10\%$:

$$C_0 = \frac{H \cdot 100}{u_0 R_{\text{ф}}} = \frac{300 \cdot 100}{10 \cdot 690} = 4{,}35 \approx 5 \ \text{мкф}.$$

Так как выпрямленное напряжение равно 515 *в*, то рабочее напряжение конденсатора должно быть не менее 600 *в*.

В данном случае можно применить бумажные или металлобумажные конденсаторы типов КБГ, КМБГ или МБГП.

14. Находим габаритную мощность трансформатора с учетом всех обмоток накала, пользуясь формулой табл. 10 (графа 11):

$$P_{\text{габ}} = 1{,}7U_2I_2 + U_3I_3 + U_4I_4 + U_5I_5 = 1{,}7 \cdot 470 \cdot 0{,}08 + 5 \cdot 2 +$$
$$+ 6{,}3 \cdot 0{,}9 + 6{,}3 \cdot 0{,}3 = 81{,}5 \ \text{ва}.$$

15. Находим по формуле (31):

$$Q_c\, Q_o = 1{,}6 P_{\text{габ}} = 1{,}6 \cdot 81{,}5 = 130 \ \text{см}^4,$$

полагая, что обмотки трансформатора будут выполнены из эмалированного провода.

16. Выбираем стандартную пластину Ш-25 ($a = 2{,}5$ *см*) с площадью окна

$$Q_o = 15{,}6 \ \text{см}^2 \ \text{(см. табл. 1 на стр. 23).}$$

Тогда необходимое сечение сердечника будет

$$Q_c = \frac{Q_o\, Q_c}{Q_o} = \frac{130}{15{,}6} = 8{,}3 \ \text{см}^2,$$

а толщина пакета

$$c = \frac{Q_c}{0{,}9a} = \frac{8{,}3}{0{,}9 \cdot 2{,}5} = 3{,}7 \ \text{см}.$$

17. Определяем по формуле (32) число витков первичной обмотки:

$$w_1 = 50 \cdot \frac{U_1}{Q_c} = 50 \cdot \frac{120}{8{,}3} = 724 \ \text{витка}.$$

18. Определяем число витков остальных (вторичных) обмоток по формуле (33):

$w_2 = 56 \cdot \frac{U_2}{Q_c} = 56 \cdot \frac{470}{8{,}3} = 3\,170$ витков (одна половина вторичной обмотки; вся обмотка должна содержать $3\,170 \times 2 = 6\,340$ витков);

$$w_3 = 56 \cdot \frac{U_3}{Q_c} = 56 \cdot \frac{5}{8{,}3} = 34 \ \text{витка};.$$

$$w_4 = w_5 = 56 \cdot \frac{6{,}3}{8{,}3} = 42 \ \text{витка}.$$

19. Определяем диаметры проводов без изоляции по формуле (34) и округляем полученные величины до стандартных:

$$d_1 = 0{,}7\sqrt{I_1} = 0{,}7\sqrt{0{,}681} = 0{,}578\ (0{,}59\ мм);$$

$$d_2 = 0{,}7\sqrt{I_2} = 0{,}7\sqrt{0{,}08} = 0{,}198\ (0{,}2\ мм);$$

$$d_3 = 0{,}7\sqrt{I_3} = 0{,}7\sqrt{2} = 0{,}99\ (1{,}0\ мм);$$

$$d_4 = 0{,}7\sqrt{I_4} = 0{,}7\sqrt{0{,}9} = 0{,}664\ (0{,}69\ мм);$$

$$d_5 = 0{,}7\sqrt{I_5} = 0{,}7\sqrt{0{,}3} = 0{,}383\ (0{,}38\ мм).$$

20. По формуле (30) находим выпрямленное напряжение при уменьшении выпрямленного тока до $I_{01} = 30$ *ма*:

$$U_{01} = 1{,}3U_2 - I_{01}\frac{4R_ф}{m} = 1{,}3\cdot 470 - 0{,}03\frac{4\cdot 690}{2} = 568\ в.$$

Выпрямленное напряжение повысилось на $568 - 515 = 53$ *в*.

Пример 14. Расчет схемы удвоения на селеновых столбиках.

Рассчитать выпрямитель по схеме удвоения дающий на выходе напряжение $U_0 = 1\,000$ *в* при токе 5 *ма* с пульсацией выпрямленного напряжения u_0 не более 3%. Напряжение питающей сети равно 220 *в*.

1. По формулам табл. 10 определяем:

выпрямленный ток в плече

$$I_0 = 5\ ма;$$

обратное напряжение

$$U_{обр} \approx 1{,}5U_0 = 1{,}5\cdot 1\,000 = 1\,500\ в;$$

импульс тока

$$I_{макс} \approx 7I_0 = 7\cdot 5 = 35\ ма.$$

2. Из табл. 9 находим, что выпрямительные столбики можно составить из дисков диаметром 7,2 *мм*, а так как допустимое обратное напряжение на один диск составляет 25 *в*, то количество дисков N в одном плече должно быть не менее

$$N = \frac{U_{обр}}{25} = \frac{1\,500}{25} = 60\ дисков.$$

3. Сопротивление селенового диска диаметром 7,2 *мм* при токе 5 *ма* равно

$$r_i = r_{i\,табл}\sqrt{\frac{I_{0\,доп}}{I_0}} = 90\sqrt{\frac{6}{5}} \approx 100\ ом.$$

Следовательно, сопротивление столбика из 60 дисков составит:

$$Nr_i = 60\cdot 100 = 6\,000\ ом.$$

4. Сопротивление трансформатора

$$r_{Tp} = k\frac{U_0}{I_0\sqrt[4]{U_0 I_0}} = 0{,}04\frac{1\,000}{0{,}005\sqrt[4]{1\,000\cdot 0{,}005}} = 5\,300\ \text{ом.}$$

5. Сопротивление фазы

$$R_\phi = Nr_i + r_{Tp} = 6\,000 + 5\,300 = 11\,300\ \text{ом.}$$

6. Коэффициент A равен

$$A = \frac{3{,}14 I_0 R_\phi}{m\frac{U_0}{2}} = \frac{3{,}14\cdot 0{,}005\cdot 11\,300}{1\cdot\frac{1\,000}{2}} = 0{,}355.$$

7. Определяем из графика фиг. 67,*а* коэффициент B и находим напряжение вторичной обмотки трансформатора:

$$U_2 = \frac{U_0}{2}B = \frac{1\,000}{2}1{,}12 = 560\ \text{в.}$$

8. Уточняем обратное напряжение на столбике и на диске:

$$U_{обр} = 2{,}8U_2 = 2{,}8\cdot 560 = 1\,560\ \text{в;}$$

$$U_{обр.\ диска} = \frac{U_{обр}}{N} = \frac{1\,560}{60} = 26\ \text{в.}$$

Так как обратное напряжение на 1 диск превышает допустимое (26 вместо 25 *в*), то увеличиваем число дисков в плече до

$$N = \frac{1\,560}{25} = 62{,}4 \approx 63\ \text{дисков.}$$

9. Из графика фиг. 67,*б* находим коэффициент F и уточняем величину импульса выпрямленного тока

$$I_{макс} = \frac{I_0}{m}F = \frac{5}{1}\cdot 5{,}8 = 29\ \text{ма.}$$

Импульс тока меньше, чем $8I_{0\ доп} = 8\cdot 6 = 48$ *ма*, следовательно, диаметр селеновых дисков выбран правильно.

10. Находим из графика фиг. 67,*в* коэффициент D и определяем ток вторичной обмотки трансформатора по формуле табл. 10 (графа 9):

$$I_2 = 1{,}4I_0D = 1{,}4\cdot 5\cdot 2{,}03 = 14{,}2\ \text{ма.}$$

11. По формуле табл. 10 (графа 10) находим ток первичной обмотки трансформатора

$$I_1 = 1{,}2nI_2 = 1{,}2\frac{560}{220}\cdot 0{,}014 = 0{,}043\ \text{а.}$$

12. Из графика фиг. 67,*г* находим коэффициент *H* и определяем входные емкости C_{01} и C_{02}, задаваясь пульсацией $u_0 = 3\%$:

$$C_{01} = C_{02} = \frac{H \cdot 100}{u_0 R_{ф}} = \frac{700 \cdot 100}{3 \cdot 11\,300} = 2{,}05 \approx 2 \ \text{мкф}.$$

Так как на каждом конденсаторе имеется напряжение 500 *в*, то рабочее напряжение конденсаторов должно быть не менее 600 *в*.

Выбор сердечника для трансформатора и расчет диаметров проводов обмоток производится в порядке, указанном в примере 13.

ЛИТЕРАТУРА

Терентьев Б. П., Электропитание радиоустройств, Связьиздат, 1951.

Гольдреер И. Г., Стабилизаторы напряжения, Госэнергоиздат, 1952.

Петров В. В. и Пионтковский Б. А., Стабилизаторы напряжения и тока, Связьиздат, 1952.

СОДЕРЖАНИЕ

Общие сведения о стабилизаторах напряжения и тока 3
Электромагнитные стабилизаторы 19
Стабилизаторы с магнитными усилителями 37
Стабилизация тока и напряжения с помощью бареттера 46
Схемы с газовыми стабилизаторами напряжения 52
Электронные стабилизаторы напряжения 63
Электронные стабилизаторы высокого напряжения 87
Электронные стабилизаторы тока 107
Выпрямители 117

К ЧИТАТЕЛЯМ

Выпуски массовой радиобиблиотеки служат важному делу пропаганды радиотехнических знаний среди широких слоев населения нашей страны и способствуют развитию радиолюбительства. В свете этих задач большое значение имеет привлечение радиолюбительской общественности к критике каждой вышедшей книги и брошюры.

Редакция массовой радиобиблиотеки обращается к читателям данной книги с просьбой прислать свои отзывы, пожелания и замечения вместе с краткими сообщениями о своем образовании, профессии, возрасте и радиолюбительском опыте по адресу: Москва, Шлюзовая набережная, д. 10. Редакция массовой радиобиблиотеки Госэнергоиздата.

Цена 3 руб.